



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**KONCEPČNÍ NÁVRH SPALOVACÍHO MOTORU PRO MALÉ
AUTONOMNÍ PROSTŘEDKY**

DESIGN OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE FOR SMALL AUTONOMOUS DEVICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Celý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Svída, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Martin Celý**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. David Svída, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Koncepční návrh spalovacího motoru pro malé autonomní prostředky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

I při narůstajícím počtu použití elektromotorů pro malé autonomní prostředky jsou jejich největší nevýhodou baterie. Hustota uložené energie ve formě uhlovodíkového paliva stále zůstává a dlouho zůstane nepřekonaná. Je tedy konstrukční výzvou navrhnout malý spalovací motor, při jehož konstrukci by se využily moderní konstrukční přístupy a materiály, který by zejména při dlouhodobém provozu konkuroval elektromotorům.

Cíle bakalářské práce:

Vytvořit koncepční návrh spalovacího motoru a jeho uspořádání pro zdvihový objem do 5 ccm.
Provést dostupný kontrolní pevnostní výpočet jeho základních částí.

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 3rd edition. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, 1999. 641 s. ISBN 0768004950.

HEISLER, Heinz. Advanced engine technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.

KÖEHLER, Eduard. Verbrennungsmotoren: Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. 3. verb. Aufl. Braunschweig [u.a.]: Vieweg, 2002. 548 s. ISBN 3-528-23108-4.

SKOTSKY, Alexander. Automotive engines: control, estimation, statistical detection. Berlin: Springer Verlag, 2009. 215 s. ISBN 978-3-642-00163-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem a výpočtem základních komponent malého spalovacího motoru do objemu 5 cm³ pro v současnosti používané autonomní prostředky menších rozměrů. Obsahuje rozbor a vzájemné porovnání dostupných pohonů pro tyto prostředky a detailnější rozbor použití pohonu spalovacího. V další části podává návrh základních parametrů motoru a následně návrh jednotlivých základních rozměrů pístu, ojnice a klikového hřídele. Závěrem práce je základní pevnostní výpočet kritických míst.

KLÍČOVÁ SLOVA

autonomní prostředek, dron, spalovací motor, píst, ojnice, klikový hřídel, objem do 5 cm³

ABSTRACT

The work deals with the design and calculation of the basic components of a small combustion engine up to 5 cm³ for currently used smaller-sized vehicles. It includes an analysis and comparison of available drives for these devices and a more detailed analysis of the use of the combustion drive. In the next part, it proposes basic engine parameters and then design of individual basic dimensions of piston, connecting rod and crankshaft. The conclusion of the thesis is a basic strength calculation of critical points.

KEYWORDS

autonomous means, drone, internal combustion engine, piston, connecting rod, crankshaft, volume up to 5 cm³

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CELÝ, M. *Koncepční návrh spalovacího motoru pro malé autonomní prostředky* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116792>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce David Svída.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Davida Svídy, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Jméno a přímení

PODĚKOVÁNÍ

Především bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Davidu Svídovi, Ph.D. za užitečné rady, trpělivost a ochotu pomoci při vypracování této práce. Dále děkuji všem mým blízkým za podporu při studiu.

OBSAH

Úvod	8
1 Rešerše	9
1.1 Autonomní letouny	9
1.1.1 Elektrický pohon	10
1.1.2 Tryskový pohon	12
1.1.3 Hybridní pohon	12
1.1.4 Spalovací pohon	13
2 Rozbor maloobjemových spalovacích pohonů	14
2.1 Krouživý pohyb pístu	14
2.2 Přímočarý vratný pohyb pístu	15
2.2.1 Zážehové motory s jiskřivou svíčkou	16
2.2.2 Zážehové motory se žhavicí svíčkou	16
2.2.3 Detonační motory	17
2.3 Motory čtyřdobé	18
2.4 Motory dvoudobé	19
2.5 Provedení základních částí motorů	20
2.5.1 Hlava válce	20
2.5.2 Válec	21
2.5.3 Pístní skupina	22
2.5.4 Ojnice	23
2.5.5 Klikový hřídel	23
2.5.6 Kliková skříň	24
2.6 Budoucnost pohonů – alternativní zdroje	24
2.6.1 Pohon pomocí rozkladu na vodík a kyslík	24
2.6.2 Parní pohon	24
2.6.3 Pohon jinými zdroji	25
2.7 Porovnání elektrického a spalovacího pohonu	25
3 Vlastní návrh motoru	27
3.1 Návrh základních parametrů motoru	27
3.1.1 Určení středního indikovaného tlaku	27
3.1.2 Určení středního efektivního tlaku	28
3.1.3 Určení zdvihového poměru	29
3.1.4 Výpočet zdvihového objemu válce	30
3.1.5 Volba kompresního poměru a výpočet kompresního objemu	30
3.1.6 Zdvihový objem motoru	30

3.1.7	Výpočet litrového výkonu	31
3.1.8	Velikost vrtání válce	31
3.1.9	Velikost zdvihu	31
3.1.10	Výpočet střední pístové rychlosti	31
3.2	Návrh hlavních rozměrů pístu	31
3.2.1	Výška pístu	33
3.2.2	Výška pláště pístu	33
3.2.3	Kompresní výška pístu	33
3.2.4	Vzdálenost mezi nálitky pístního čepu	33
3.2.5	Vzdálenost segerových kroužků	33
3.2.6	Průměr pístního čepu	33
3.2.7	Výška prvního můstku	34
3.2.8	Tloušťka dna pístu	34
3.3	Návrh hlavních rozměrů ojnice	34
3.3.1	Délka ojnice	35
3.3.2	Šířka ojnice	35
3.3.3	Vnitřní průměr oka ojnice	35
3.3.4	Vnější průměr oka ojnice	36
3.3.5	Šířka oka ojnice	36
3.3.6	Vnitřní průměr hlavy ojnice	36
3.3.7	Vnější průměr hlavy ojnice	36
3.3.8	Šířka hlavy ojnice	36
3.3.9	Tloušťka ojnice	36
3.3.10	Tloušťka dříku ojnice	36
3.4	Návrh hlavních rozměrů klikového hřídele	37
3.4.1	Průměr hlavního čepu	37
3.4.2	Šířka hlavního čepu	37
3.4.3	Průměr ojnicního čepu	37
3.4.4	Šířka ojnicního čepu	38
3.4.5	Šířka ramena kliky	38
4	Pevnostní výpočet vybraných částí	40
4.1	Pevnostní výpočet dna pístu	40
4.1.1	Maximální síla od tlaku plynů	40
4.1.2	Maximální ohybový moment	40
4.1.3	Průřezový modul v ohybu	41
4.1.4	Maximální ohybové napětí	41

4.1.5	Maximální ohybové napětí na vetknutou desku	41
4.2	Nejslabšího místa pláště pístu – namáhání tlakem	41
4.2.1	Plocha nejslabšího místa pláště pístu	42
4.2.2	Maximální tlakové napětí	42
4.3	Nejslabšího místa pláště pístu – namáhání tahem	42
4.3.1	Hmotnost koruny pístu	43
4.3.2	Poloměr klikového hřídele	43
4.3.3	Maximální úhlová rychlost klikového hřídele	43
4.3.4	Ojniční poměr	44
4.3.5	Setrvačná síla posuvných hmot	44
4.3.6	Maximální tahové napětí	44
4.4	Měrný tlak na plášti pístu	44
4.4.1	Úhel pootočení klikového hřídele od horní úvratě	44
4.4.2	Síla působící na píst od tlaku plynů	45
4.4.3	Celková hmotnost posuvných hmot	45
4.4.4	Setrvačná síla působící na píst	47
4.4.5	Výsledná síla působící na píst ve vertikálním směru	47
4.4.6	Úhel mezi osou ojnice a osou válce	47
4.4.7	Maximální normálová síla	47
4.4.8	Měrný tlak	47
	Závěr	48
	Seznam použitých zkratk a symbolů	51

ÚVOD

V dnešním moderním světě, kdy často hovoříme o příchodu čtvrté průmyslové revoluce, se stále častěji setkáváme s pojmem autonomní prostředky. Odborně se dá říct, že tímto pojmem rozumíme takový prostředek, který ke svému provozu nepotřebuje řidiče a pohybuje se jen pomocí počítačových systémů, které detekují okolní prostředí a určují tak jeho trasu. Dnes se tohle všechno již stává realitou, protože lidstvo opravdu začalo soběstačné prostředky vyrábět a vytvářet tak budoucnost tohoto typu průmyslu. Tato bakalářská práce se zabývá autonomními prostředky menších rozměrů, čili nebudou zde popisovány stroje určené pro přepravu lidí nebo větších nákladů, ale zaměření padne na prostředky menších rozměrů, jejichž využití je také velmi pestré.

Každý pohybující se prostředek potřebuje ke svému pohybu nějaké pohonné ústrojí. Když se řekne pohonné ústrojí, každého hned jistě napadne použít elektrický motor. Elektrické motory mají nespočet výhod, pro svoji velikou jednoduchost jsou vhodné takřka pro každého, mají však jednu obrovskou nevýhodu v podobě zdroje energie – akumulátoru. Ty mají v praxi bohužel často velkou hmotnost spojenou s velkými rozměry, poměrně rychle se vybíjejí a v neposlední řadě mají také krátkou životnost. Pro nás to znamená, že například pobyt autonomního letounu ve vzduchu není neomezený a je třeba hledat nové technologie ke zlepšení času doletu, případně dojezdu těchto strojů. Mezi jednu z nich lze zařadit použití malého spalovacího motoru, který by tento problém mohl pomoci zlepšit, a navíc by zde odpadla nutnost nabíjení onoho akumulátoru.

1 REŠERŠE

Výpočetní technika udělala za posledních několik let velký krok kupředu a stala se tak naprostou samozřejmostí našich životů. Moderní mikroprocesory a mikropočítače díky svým velice malým rozměrům a vysokým výkonům jsou nasazovány do různých průmyslových odvětví. Jedním z nich je i robotika, resp. autonomní prostředky. Ty lze nejjednodušeji rozdělit do tří základních skupin podle prostředí, ve kterém se pohybují, na:

- Autonomní vozidla
- Autonomní letouny
- Autonomní plavidla

Současná autonomní vozidla a plavidla se zatím vyrábějí v podstatně větších rozměrech, takže jsou určena pro přepravu lidí, nákladů a podobných. Z toho vyplývá, že tyto stroje dalece přesahují požadavky na malé rozměry spojené s maloobjemovým spalovacím motorem. Z tohoto důvodu se tato práce bude zabývat autonomními letouny, které jsou v menších rozměrech již plně dostupné a najdou si svá uplatnění.

1.1 AUTONOMNÍ LETOUNY

Autonomní letouny můžeme rozdělit podle typu na:

- Vrtulníky
- N-koptéry
- Letadla

Na dnešním trhu v oblasti autonomních letounů si získávají svoji popularitu zejména N-koptéry (dále již drony), proto bude v následujících podkapitolkách, kde budou rozvedeny druhy pohonů dronů, vždy jako zástupce daného pohonu uveden dron. Drony lze rozdělit podle počtu rotorů (elektromotory osazené vrtulemi), kterými disponují, na trikopty (tři rotory), kvadrokopty (čtyři rotory), hexakopty (šest rotorů) a oktaakopty (osm rotorů). Dnes jsou nejčastěji používány kvadrokopty. Mohou být ovládány pilotem, pomocí pozemní kontrolní stanice nebo pomocí předem naprogramovaného letového plánu nebo pomocí složitějších dynamických autonomních systémů. Rozdílem při pořizování takového dronu jsou v použitých materiálech, vybavením a v neposlední řadě cenou a také stabilitou, kterou mají při letu. Podle oblasti nasazení dronů lze tyto stroje rozdělit do následujících funkčních kategorií [6]:

- Cíle a návnady - poskytují pozemní a vzdušné cíle simulující nepřátelské letadla nebo střely
- Průzkumné - poskytující informace o bojišti
- Bojové - schopné útoku ve velmi rizikových misích
- Logistické - speciálně navržené pro logistické účely
- Výzkumné a vývojové - používané k dalšímu vývoji UAV technologií
- Civilní a komerční - speciálně navržené pro civilní nebo komerční aplikace

Autonomní drony jsou vhodné především pro začínající piloty. Mnoho začínajících pilotů dobře ví o komplikacích, které mohou nastat u dronů manuálně řízených, jako jsou různé

nehody, kolize a v neposlední řadě také odlet letounu mimo dosah vysílačky. Pokud dron ztratí kontakt s řídicí jednotkou, tak nedokáže reagovat na příkazy. Pilotní chyba a špatné posouzení dané situace také může způsobit, že se drony chovají destruktivně. Autonomní režimy a funkce pomáhají předcházet všemu výše uvedenému automatizací určitých úkolů. Mezi nejčastěji používané autonomní funkce lze zařadit sledování určitého cíle, navrácení dronu ke svému majiteli, použití předem definovaných trasových bodů, vyhýbání se překážkám a mnoho dalšího.

Autonomní drony mohou být vybaveny různým druhem pohonu. Jedná se o:

1.1.1 ELEKTRICKÝ POHON

V současnosti zdaleka nejpoužívanější pohon dronů. Je to dáno tím, že elektrické motory jsou velice jednoduché na provoz a nevyžadují prakticky žádné seřizování svých jednotlivých částí, doplňování pracovních kapalin, přípravu paliv a další údržbu. Rovněž jejich spouštění je znatelně snadnější. Používají se dva typy elektrických motorů, a to stejnosměrné a střídavé. Jak bylo již naznačeno v úvodu této práce, největší slabina tohoto druhu pohonu tkví v akumulátorech a jejich doby výdrže. Nízká energetická hustota akumulátorů znamená malé množství energie dostupné pro elektromotor vzhledem k hmotnosti akumulátoru. V současnosti se používají dva typy akumulátorů, Li-Pol (lithium-polymerový) a Li-Ion (lithium-iontový). Velký vliv na dobu doletu má samozřejmě hmotnost dronu. Se zvyšující se hmotností připadá nutnost použít akumulátoru o větší kapacitě. Dolet též ovlivňuje samotný styl létání.

Mezi zajímavé a dostupné modely lze zařadit:

➤ DJI Inspire 2

Jedná se kvadrokoptéru od společnosti DJI, nabízející vysokou kvalitu zpracování a udávanou výdrž 27 minut letu při hmotnosti dronu 3,44 kg. Tento dron najde uplatnění v komerčních účelech a zábavném průmyslu. Dron disponuje dvěma akumulátory s kapacitou po 4280 mAh, váha každého z nich činí 515 g. Výrobce uvádí, že maximální rychlost, kterou dron vyvine ve sportovním módu, dosahuje téměř 100 km/h [7].



Obr. 1 Dron DJI Inspire 2

➤ AirDog ADII

Jako další zajímavý model je zde uveden tento dron od firmy Airdog určený opět pro běžné komerční účely a zábavný průmysl. Hmotnost dronu činí pouhé necelé 2 kg, což umožňuje asi 15 minut letu. Akumulátor má kapacitu 5550 mAh a váží 607 g. Maximální rychlost, kterou dron dokáže vyvinout, odpovídá hodnotě 72 km/h [8].



Obr. 2 Dron AirDog ADII [8]

➤ BRUS

Bezpilotní rotorový univerzální systém (BRUS) je český armádní dron, který byl vyroben Vojenským ústavem letectva a protivzdušné obrany. Jeho použití je v náročných podmínkách, kde nelze použít klasickou leteckou techniku, pro záchranné a humanitní účely. Pro dosažení výborné stability disponuje šesti velkými vrtulemi, každou z nich pohání elektromotor o výkonu 400 W, o napájení se stará 16 Ah akumulátor o hmotnosti 1985 g, který dává dronu pobyt 40 minut ve vzduchu. Prázdná hmotnost nepřesahuje 4,5 kg, dron zvládne letět rychlostí přibližně 50 km/h [9].



Obr. 3 Dron BRUS [9]

1.1.2 TRYSKOVÝ POHON

Drony s tryskovým pohonem jsou poháněny buď samotným proudovým motorem, nebo kombinací proudového motoru a elektromotoru. Tento typ pohonu má oproti klasickému elektrickému tu výhodu, že dosahuje větší energetické hustoty paliva vztažené na jeden kilogram. Tak například dron na obr. 4 používá pro proudový motor naftové palivo, které má energetickou hustotu 40 MJ/kg, zatímco běžné lithiové baterie pouze 1 MJ/kg [10]. To znamená, že pro stejné množství paliva v zásobníku nabízí tryskový pohon 40krát více energie nežli pohon elektrický. Další plus je, že tryskový pohon dosahuje mnohem většího poměru výkonu k hmotnosti. Dron na obr. 10 je vybaven malými tryskovými motory, které mohou dosahovat až 150 000 otáček za minutu, což vede k obrovskému množství energie vyrobené z malého proudového motoru.

➤ JetQuad

Drony s tryskovým pohonem zastupuje ve své třídě zatím nejmenší a nejvýkonnější (vzhledem ke svým rozměrům) vyrobený dron disponující pouze tryskovým pohonem a možností vertikálního vzletu i přistání. Dron je vybaven čtveřicí proudových motorů, jenž každý z nich generuje výkon 25 koňských sil, což dává dohromady rovných sto koňských sil. Motory spalují běžné naftové palivo. Výrobce udává maximální hmotnost nákladu necelých 14 kilogramů a při plném zatížení dolet asi 8 minut, což není mnoho, nicméně proudové motory umožní dronu dosáhnout v běžných atmosférických výškách rychlosti skoro 500 km/h, což představuje dolet na vzdálenost 65 kilometrů [10].



Obr. 4 Dron JetQuad [10]

1.1.3 HYBRIDNÍ POHON

Jedná se o kombinaci elektrického a spalovacího. Využití obou motorů je u většiny hybridních dronů odlišné od hybridů v automobilovém průmyslu. Zatímco tam slouží elektromotory pro rozjezd a pomalý pohyb vpřed, drony je využijí k rychlým změnám směru a spalovací motory k rozletu a stoupání. Duální systém motorů funguje zároveň jako záloha. Pokud by se některý systém pokazil, druhý snese dron automaticky a bezpečně na zem.

➤ **Yeair!**

Jako zástupce hybridních dronů je uveden dron s označením Yeair!. Model disponuje čtyřmi vrtulemi a každou z nich pohání elektromotor s výkonem 600 W a dvoudobý motor o objemu 10 cm³ a výkonu 1000 W. Celkový výkon pak dá v součtu 6 400 W. Dron je vybaven malým akumulátorem o kapacitě 1 250 mAh, baterie je během provozu od spalovacích motorů dobíjena. Dron zvládne až 5 kg zátěž, maximální rychlost činí až 100 km/h a při hmotnosti 4,9 kg se dron udrží asi hodinu ve vzduchu [11].



Obr. 5 Dron Yeair! [11]

1.1.4 SPALOVACÍ POHON

Protože se tato práce zabývá návrhem spalovacího motoru, bude problematika tohoto pohonu podrobně rozvedena v další kapitole.

Tab. 1 Charakteristické vlastnosti vybraných dronů

Název dronu	Doba doletu [min]	Maximální rychlost [km/h]	Hmotnost dronu [kg]	Pohon
DJI Inspire II	27	100	3,44	elektrický
AirDog ADII	15	72	2	elektrický
BRUS	40	50	4,5	elektrický
JetQuad	8 (při plném zatížení)	500	výrobce neudává	tryskový
Yeair!	60	100	4,9	hybridní

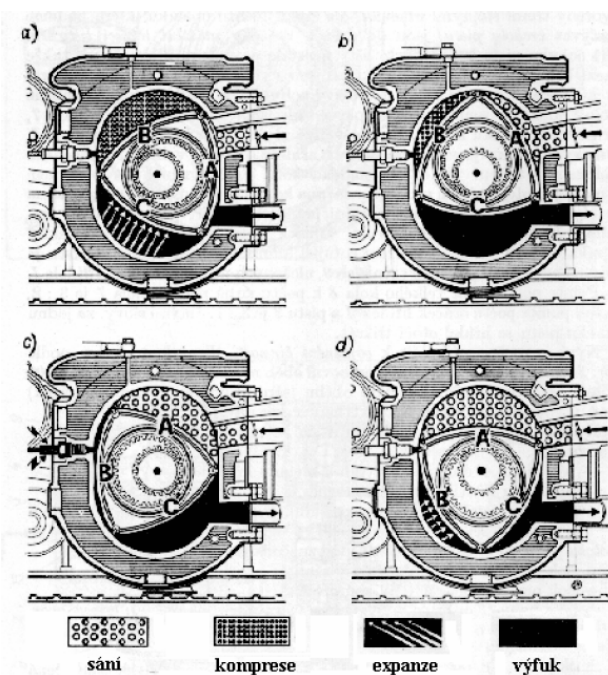
2 ROZBOR MALOOBJEMOVÝCH SPALOVACÍCH POHONŮ

Spalovací motor je tepelný hnací stroj, který převádí získávanou tepelnou energii ve formě spalování paliva na mechanickou práci na hřídeli motoru. Mechanická energie je produkována díky periodicky se opakujících otevřených pracovních oběhů, které probíhají v objemu uzavíraném pístem motoru. Pístové spalovací motory využívají především potenciální energii palin.

Základní rozdělení motorů bude spočívat podle pohybu pístu. Pro malý autonomní prostředek lze tedy pořídit motor s následujícími pohyby pístu:

2.1 KROUŽIVÝ POHYB PÍSTU

Spalovací motory se zkráceným klikovým mechanismem mají mnoho kladů, ale taktéž i částečně nedostatků. Snahou vždy byl zkonstruovat motor, který by měl jednoduché pohybové vlastnosti a přitom měl stejný pracovní oběh, jako stroj s přímočarým pohybem pístu. Těmto požadavkům by měl vyhovovat spalovací motor s krouživým pohybem pístu (někdy též Wankelův motor). Je realizován na základě rozpínání plynů. Vnitřek motoru je konstruován tak, aby v něm docházelo k cyklickému a plynulému zvětšování a zmenšování prostorů (komor) mezi válcem a pístem. Na obr. 6 je vidět schéma činnosti Wankelova motoru. Poměr otáček výstupního hřídele a pístu trojúhelníkového tvaru je 3 : 1, za jednu otáčku pístu vykoná každý bok pístu jeden oběh, celý píst vykoná tři oběhy. Tedy na jednu otáčku hřídele připadá jeden pracovní oběh. Lze tedy konstatovat, že jednopístový Wankelův motor je ekvivalentní dvouválcovému čtyřdobému motoru [2].



Obr. 6 Oběh Wankelova motoru [2]

V porovnání s klasickým pístovým motorem má Wankelův motor tyto výhody [2]:

- Klidnější chod - motor je možno velmi dobře vyvážit protizávažími na hřídeli rotou
- Výborný poměr výkonu k hmotnosti. Proto tyto motory snesou větší užitná zatížení
- Menší počet součástí

A nevýhody [2]:

- Obtížné utěsnění komor a větší kluzné rychlosti těsnících lišt – malá životnost
- Protáhlý tvar spalovacího prostoru vede k velkému úniku tepla a tím i snížení účinnosti
- Nízká hodnota skutečného kompresního poměru z důvodu geometrie pohybu pístu
- Vyšší měrná spotřeba paliva z důvodu snížené účinnosti a zmenšeného kompresního poměru
- Vyšší měrná spotřeba oleje – jeho značné množství na mazání těsnících lišt

Společností zabývajících se výrobou malých Wankelových motorů pro menší stroje není mnoho, přesto je zde uveden například motor 49-PI Type II od firmy O.S. Engines. Motor má hmotnost pouhých 450 g, objem necelých 5 cm³ a nabízí výkon 820 W při otáčkách 17 000 min⁻¹ [12].



Obr. 7 Motor 49-PI Type II [12]

2.2 PŘÍMOČARÝ VRATNÝ POHYB PÍSTU

Pohyb pístu je realizován pomocí spálení kapalného paliva. U současných maloobjemových motorů jsou využívány dva různé způsoby zažehnutí směsi, a to zažehnutí směsi svíčkou pod teplotou vlastního samovznícení směsi (pak mluvíme o zážehových motorech) a zažehnutí kompresním tlakem u detonačních (vznětových) motorů. Motory jsou realizovány jako atmosférické, tedy nemají přeplňování, které by sice přineslo zvýšení výkonu, ale znamenalo by složitější konstrukci, vyšší hmotnost a větší velikost motoru. Chlazení motorů se nejčastěji používá přímé náporové, motor je tak chlazen při pohybu stroje proudem okolního vzduchu. Pro zajištění odvodu tepla je vnější povrch válce zvětšen chladicími žebry pro navýšení teplosměnné plochy. Výhoda tohoto chlazení spočívá v jednoduchosti, nízké hmotnosti a rychlého ohřevu válce na provozní teploty. Existují také motory s vodním chlazením, určené pro modely používané v extrémních podmínkách (třeba při velmi pomalém

pohybu stroje, kde by proud okolního vzduchu nebyl dostatečné chladicí médium). Jejich válec je vybaven pláštěm s otvory pro cirkulaci vody a klikový hřídel pohání navíc malé zubové čerpadlo pro nucený oběh vody.

Všechny motory s přímočarým pohybem pístu lze rozdělit podle způsobu zapálení směsi na:

2.2.1 ZÁŽEHOVÉ MOTORY S JISKŘIVOU SVÍČKOU

Tyto motory lze charakterizovat jako klasické benzínové, které jsou známy z běžných automobilů, motocyklů, a jiných. Většina motorů používá elektronické zapalování, které dá v předem stanovený okamžik před horní úvratí pístu (předstih zapalování) elektrický impuls. Klikový hřídel motoru obsahuje elektromagnetický snímač, pomocí něhož zná elektronika zapalování aktuální polohu pístu a dokáže tak načasovat předstih zapalování pro maximalizaci výkonu dle příslušných otáček motoru. Některé motory mohou mít i magnetové zapalování, které používá permanentní magnety k vytvoření elektrických impulsů pro zapalovací svíčku. Toto zapalování je spolehlivější než elektronické, ale těžší, na druhou stranu ale nevyžaduje akumulátor.

Mezi elektrodami zapalovací svíčky dochází k umělému zažehnutí elektrickou jiskrou předem připravené směsi paliva a vzduchu. Maximální kompresní teplota je omezena specifikovaným kompresním poměrem daného motoru. Jako palivo je použito lehké kapalné palivo – běžný benzín a to ve směsi s olejem (ricinovým nebo syntetickým) a to v případě dvoudobých i čtyřdobých motorů. V případě dvoudobých motorů olej tvoří 2 až 5% směsi, čtyřdobé motory využívají směs, kde olej tvoří průměrně 20% směsi. Poměr se liší podle specifikace ložisek motoru a použité vložky válce.

V současné době jsou k dostání na trhu s nejmenším objemem 10 cm³. Jejich velikost je limitována rozměry zapalovacích svíček a také velikostí elektronického zapalování, které jsou pro malé modely rovněž příliš těžké. Výhodou těchto motorů je jejich čistý provoz, motory se žhavicí svíčkou se totiž velice špiní od oleje. Uvádí se, že při stejném objemu motoru tyto motory oproti žhavicím spotřebují mnohem menší množství paliva (cca poloviční), na druhou stranu však mají citelně nižší výkony. Údržba je zde také jednodušší, motory se nemusí nijak konzervovat, protože na rozdíl od motorů se žhavicí svíčkou zde palivo není korozivní [17], [18].

2.2.2 ZÁŽEHOVÉ MOTORY SE ŽHAVICÍ SVÍČKOU

Těž nazývány zkráceně jako žhavicí motory nebo i nitro-motory. Žhavicí motory využívají ke svému pohonu speciální směs. Nejčastěji se jedná o Metanol (CH₄O) a olej. Metanol je zde použit jako výbušná směs a olej jako mazivo a chladicí kapalina. Olej tvoří zhruba 20% směsi (pro dvoudobé i čtyřdobé motory), poměr se opět může mírně lišit dle doporučení výrobce motoru. Olej má kromě běžných úkolů také úkol chránit jednotlivé komponenty motoru před korozí. Použitý metanol ve žhavicích motorech vstřebává více vody z okolní atmosféry než benzín, což se navenek projevuje jako rez. Dalším problémem je, že většina paliv obsahuje nitrometan, chemickou látku, která může při spalování produkovat korozivní (kyselé) vedlejší produkty. Olej může být opět syntetický nebo ricinový. Syntetický olej lépe maže, ale hůře odvádí teplo než olej ricinový, je tedy vhodný spíše pro větší motory. Ricinový olej zase dobře zabráňuje korozi. Pro zvýšení výkonu a zlepšení přechodů z volnoběhu do maximálních otáček se do paliva přidává nitrometan (CH₃NO₂), kde podíl

nitrometanu se zpravidla pohybuje od 1% do 10% z celkového množství směsi. Nitrometan snižuje teplotu samovznícení směsi, je tedy třeba hlídat, aby nedocházelo k detonačnímu spalování, které by způsobilo snížení výkonu a větší namáhání motoru.

Nedílnou součástí u těchto motorů je takzvané žhavení. Jedná o zdroj nízkého napětí, které rozžhne žhavicí svíčku. Ta se liší od klasické jiskřivé tím, že jsou v ní nahrazeny elektrody za vlákno z tepelně odolného kovu, nejčastěji platiny nebo iridia. Před spuštěním motoru se svíčka nažhaví z externího zdroje (připojení napětí), vlákno se rozžhává a dále žhne i po odpojení zdroje napětí během provozu motoru díky vysoké teplotě spalovací komory. Využívá se zde tepelné setrvačnosti vlákna. Při chodu motoru se směs paliva se vzduchem vznítí od rozžhavaného vlákna [17], [18].

Tyto motory mají nižší pořizovací cenu než motory s klasickou jiskřivou svíčkou a vyrábějí se i v menších velikostech, na našem trhu jsou k dostání už od objemu 1 cm³. Jsou však složitější na jak na údržbu, tak i na seřizování (například vstříkovacího zařízení) a mají též vyšší náklady na provoz spojené s cenou paliv, která rychle smaže výhodu nižší pořizovací ceny. Žhavicí motor bude mít vyšší poměr výkonu k hmotnosti a nepotřebuje zapalování, což je naopak velké plus.

2.2.3 DETONAČNÍ MOTORY

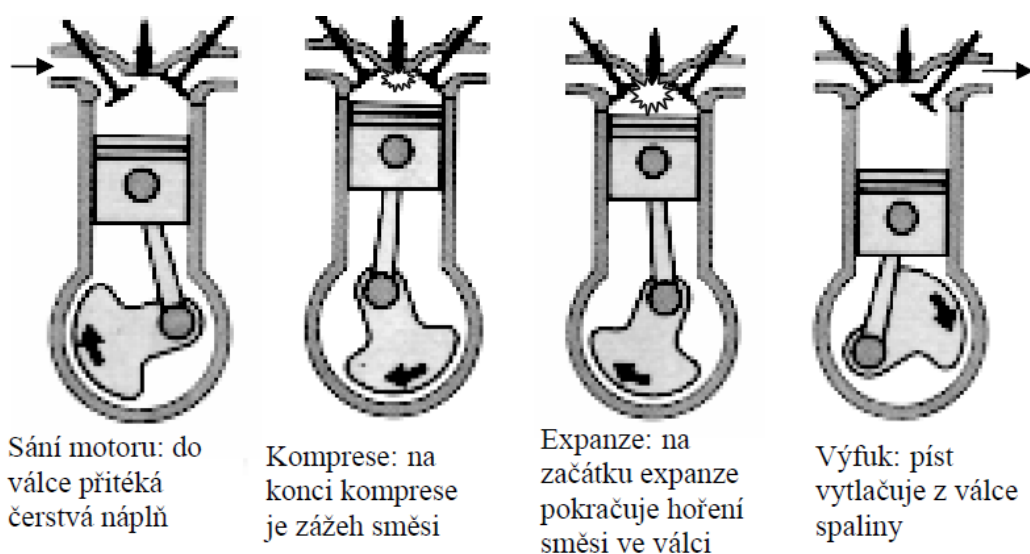
Někdy též označovány jako samozápalné motory. Dochází k samočinnému vznícení směsi paliva a stlačeného vzduchu, kde vzduch je zahřát díky kompresi na teploty vyšší, než je zápalná teplota paliva. Princip tvorby směsi se ale odlišuje od běžných vznětových motorů, kde motory nasávají čistý vzduch, a palivo je do vzduchu před dosažením horní úvratě vstříknuto. U detonačních motorů dodává karburátor do motoru již palivo smíchané se vzduchem v požadovaném poměru. Jako palivo používají směs dietyleru ((CH₃CH₂)₂O), petroleje nebo klasické motorové nafty a ricinového či parafinovaného oleje. Vhodný poměr pro většinu motorů je 1:1:1, poměr se může pochopitelně lišit dle typu motoru. Pohon pouze na klasickou naftu, který známe z běžných vznětových motorů nelze použít, neboť teplota samovznícení nafty je velmi vysoká, vyžaduje tak stlačení na mnohem vyšší tlak. To vede k vysokým nárokům na pevnost klikového mechanismu a těsnosti pístu ve válci. To je u maloobjemových motorů obtížné docílit, přidává se tedy do paliva dietyler, který má mnohem nižší teplotu samovznícení a stačí mu tak nižší kompresní tlaky. Podobně jako u žhavicích motorů nitrometan, tak i zde je možné přidat aditivní složku – nejčastěji amylnitrit (C₅H₁₁NO₂), který zlepšuje startování motoru a zvýší otáčky motoru, neboť vnáší do paliva více kyslíku a tím zrychluje hoření. Kompresní poměr motorů je proměnný a lze jej seřizovat protipístem. Hlava válce je opatřena takzvanou kompresní páčkou (kličkou). Při zašroubovávání kličky se protipíst pohybuje ve válci a zmenšuje spalovací prostor, tím zvyšuje kompresní poměr.

Detonační motory jsou náročnější na spuštění a na seřízení než zážehové. Oproti zážehovým potřebují masivnější konstrukci, protože pracují s vyššími kompresními poměry a tlaky. Jejich výhodou je naopak to, že mají menší spotřebu paliva, takže stejně velká nádrž paliva vydrží déle u detonačního motoru. Další plus je, že dosahují vyšších točivých momentů a dosahují stejných výkonů co zážehové při nižších otáčkách, což právě vede k nižší spotřebě paliva [18], [19].

Všechny výše uvedené motory lze dále rozdělit podle počtu zdvihů pístu, které připadají na jeden pracovní oběh, na:

2.3 MOTORY ČTYŘDOBÉ

Na jeden pracovní oběh připadají čtyři zdvihy. Všechny čtyři doby se uskuteční za dvě otáčky klikového hřídele. Schéma jednotlivých dob lze vidět na obr. 8. Pro otevírání a zavírání ventilů se u maloobjemových motorů používá v naprosté většině případů rozvod OHV. Rozvod OHV – ventily jsou umístěny v hlavě válce motoru a vačková hřídel v bloku motoru. Vačková hřídel je za pomoci ozubeného převodu poháněna od klikového hřídele. Pohyb mezi vačkou a ventilem pracuje za pomoci zdvihací tyčky, zdvihátka a vahadla (tedy dvojzvrtné páky). Jeho výhodou je jednoduché uspořádání a snadné seřizování. U některých motorů vyšších objemů (nad 5 cm³) se také uplatňuje rozvod OHC, který je složen ze samotného vačkového hřídele umístěného v hlavě válce, ten je poháněn většinou ozubeným řemenem. Mazání motorů je realizováno tak, že v palivu je obsažen olej. Obsazení oleje v palivu u čtyřdobých motorů je odůvodněno tím, že by ho byla v klikové skříně jen troška, olej by tak velmi rychle při vysokých provozních otáčkách a teplotách degradoval. Kolem pístního kroužku projde část paliva s olejem do prostoru klikové skříně. Když se klikový hřídel otáčí, tak olej začne odpařovat a vzniká olejová mlha. Dojde tak k mazání olejovou mlhou, která maže všechna ložiska klikového hřídele a ojnicí ložiska, některé motory mají průchod mezi klikovou a vačkovou skříní, maže se tedy i vačková hřídel (ložiska a převod), vačky a zdvihátka. Některé části čtyřdobého motoru však vyžadují ruční mazání. Maže se horní část rozvodu OHV, stejně tak zdvihací tyčky a případně také vačková hřídel s vačkami a zdvihátka [20].



Obr. 8 Oběh čtyřdobého zážehového motoru [3]

Výhody čtyřdobého motoru oproti dvoudobému:

- Menší měrná spotřeba paliva (cca o 30%)
- Vyšší účinnost
- Menší tepelné zatížení motoru (poloviční počet zážehů) – tím i lepší chlazení motoru
- Pravidelnější chod
- Dobrý průběh kroutícího momentu i při malých otáčkách
- Menší hlučnost

2.4 MOTORY DVOUDOBÉ

Tento motor pro všechny čtyři doby potřebuje pouze dva zdvihy, tedy stačí mu jedna otáčka klikového hřídele. Schéma jednotlivých dob lze vidět na obr. 9. a jak je také patrné, u dvoudobého motoru probíhá zároveň sání a komprese a zároveň expanze a výfuk. Budou-li tedy existovat dva motory se stejnými parametry, bude dvoudobý výkonnější. Zatímco totiž čtyřdobý vykoná jeden cyklus, dvoudobý vykoná cykly dva. Přívod zápalné směsi do spalovacího prostoru je na rozdíl od ventilů u čtyřdobých motorů realizován pomocí pístu a kanálů ve stěnách válce. Píst tak při pohybu otevírá a zavírá výfukový a přepouštěcí kanály. Otevírání a zavírání kanálů výrazně ovlivňuje tvar skutečných cyklů a také bohužel snižuje účinnost motoru. Spaliny nejsou z pracovního prostoru válce odváděny pístem jako u motorů čtyřdobých, ale čerstvou náplní, která proudí skrz přepouštěcí kanál do pracovního prostoru válce pod tlakem, který musí být vyšší, než je tlak spalin ve válci. Vyplachování dvoudobých motorů je realizováno jako vratné. Použití příčného vyplachování motoru by znamenalo použít píst s deflektorem (nálitkem), což by zvýšilo jeho hmotnost (nechceme) a zkomplikovalo tvar spalovacího prostoru. Soudobé vyplachování by zase mělo za následek složitější konstrukci motoru. O použitých typech rozvodů sání motorů je pojednáno v podkapitole 2.5.6. Mazání motorů je řešeno tak, že směs paliva s olejem prochází klikovou skříní a maže tak všechny potřebná uložení pohybujících se částí motoru [14].



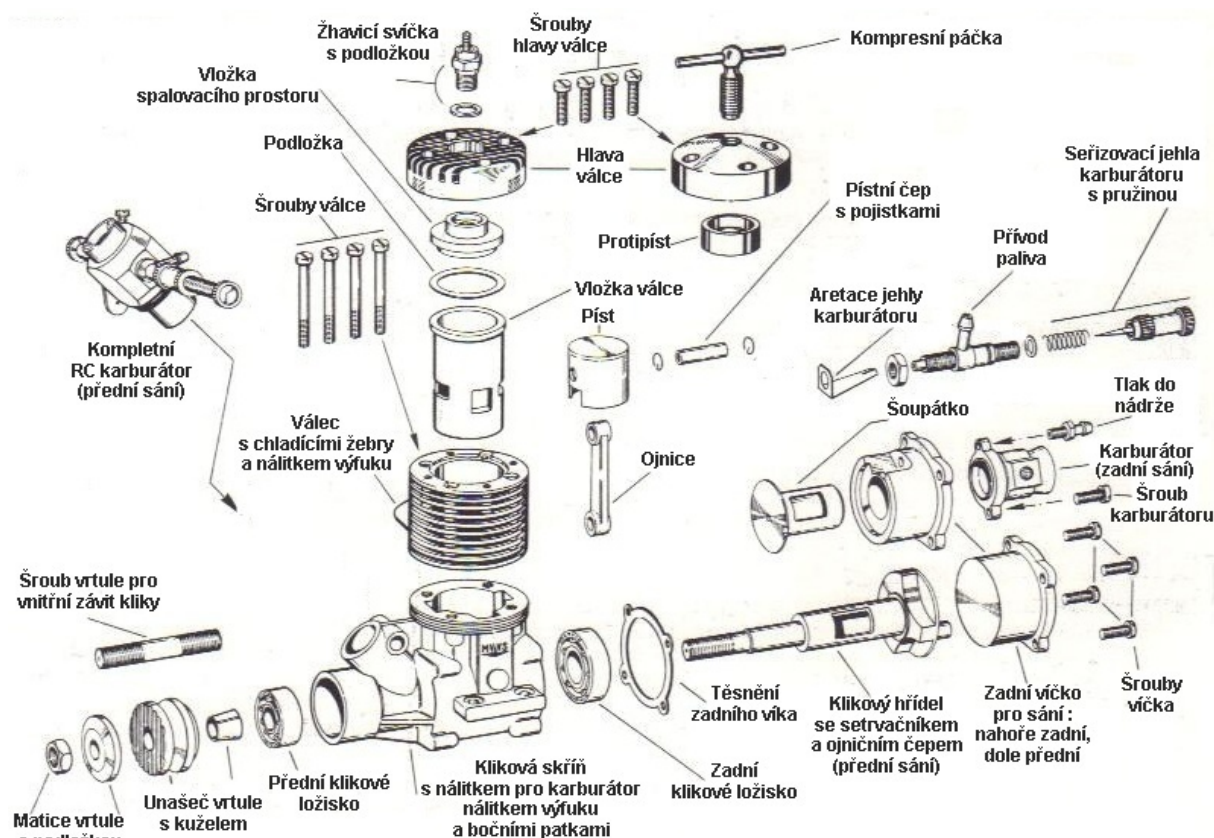
Obr. 9 Oběh dvoudobého zážehového motoru [3]

Výhody dvoudobého motoru oproti čtyřdobému:

- Jsou jednodušší konstrukce, mají menší počet součástí, tím i menší nároky na obsluhu a menší poruchovost
- Větší měrný výkon (teoreticky dvojnásobný, ale prakticky pouze jen asi o 10% - nedokonalé plnění a vyplachování válce)
- Rovnoměrnější kroutící moment

2.5 PROVEDENÍ ZÁKLADNÍCH ČÁSTÍ MOTORŮ

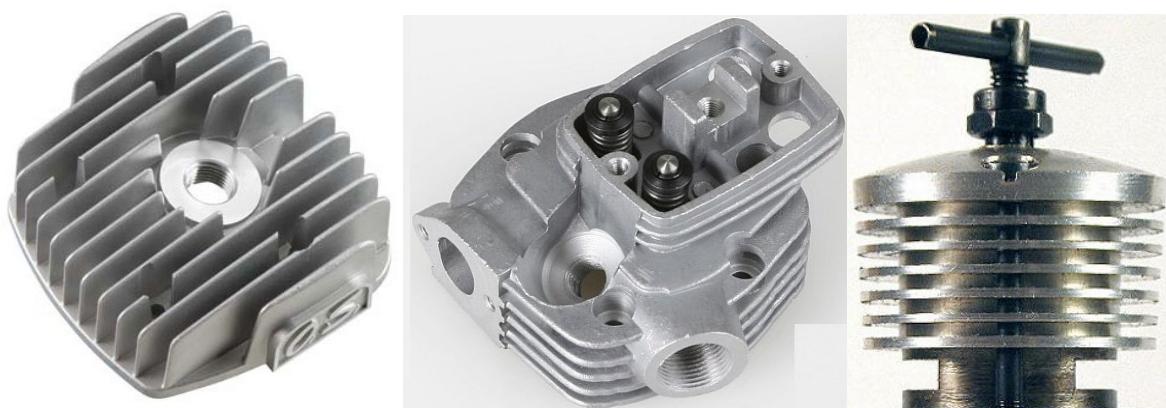
Na obr. 10 je možné vidět běžný rozložený maloobjemový dvoudobý motor s popisky. Lze na něm spatřit rozdíl v provedení hlavy válce pro zážehový a detonační motor, stejně tak rozdíl mezi předním a zadním sáním motoru. Tato různá konstrukční řešení, použité materiály a technologie výroby hlavních částí motorů budou podrobněji rozvedeny v následujících podkapitolkách.



Obr. 10 Rozložený maloobjemový motor [14]

2.5.1 HLAVA VÁLCE

Hlava válce se vyrábí z hliníkových slitin tlakovým odléváním, případně obráběním. Ke zvětšení teplosměnné plochy má stejně jako válec chladičí žebra. K samotnému válci bývá připojena čtyřmi nebo šesti šrouby. Pro zlepšení těsnosti motoru se mezi hlavu a válec umísťuje těsnění hlavy válce. V případě dvoudobých zážehových motorů (obr. 11 vlevo) má hlava pouze otvor pro jiskřivou či žhavicí svíčku u zážehových motorů nebo kličku, pomocí které lze posouvat protipístem, u detonačních motorů (obr. 11 vpravo). V případě čtyřdobých motorů (obr. 11 uprostřed) hlava oproti dvoudobým motorům obsahuje část rozvodového systému OHV, tedy dva ventily (sací a výfukový), otvor pro našroubování vahadla a otvory pro zdvihací tyčky. To celé je posléze schované krytkou. Samozřejmě nechybí ploška pro připojení karburátoru a náliček výfuku. Některé zážehové motory mají ještě samostatnou vložku hlavy válce, která vytváří spalovací prostor. Ten může mít různý tvar, nejčastěji je půlkulový a jeho průměr bývá často menší, než je vrtání válce. Takto vzniklé osazení způsobí větší víření směsi paliva a větší účinnost spalování [14].



Obr. 11 Různá provedení hlav válců motorů [15]

2.5.2 VÁLEC

Válec motoru může být buď přímo součástí klikové skříně, nebo bývá vyroben odléváním jako samostatný kus a je ke klikové skříně přišroubován. U dvoudobých motorů jsou ve válci navíc odlity přepouštěcí kanály a náletek výfuku. V naprosté většině případů je válec opatřen takzvanou vložkou válce. Provedení vložek válců se dělí na dva typy, které tak dávají motoru dvě různé možnosti, jak zajistit těsnost pístu, aby vytvářel kompresi.

➤ Cylindrická vložka válce

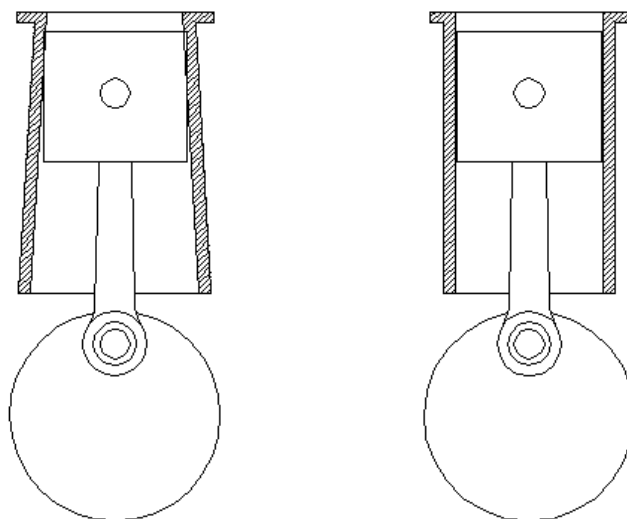
Tuto vložku využívají písty s pístními kroužky. Vložka má válcový tvar, pro čtyřdobé motory (obr. 12 vlevo) bez otvorů a pro dvoudobé motory (obr. 12 uprostřed a vpravo) jsou ve vložce vyfrézovány drážky pro přepouštění směsi z klikové skříně do spalovacího prostoru a odtok spalín ven ze spalovacího prostoru do výfuku.



Obr. 12 Různá provedení cylindrických vložek válců motorů [15]

➤ Kónická vložka válce

U těchto motorů se píst pohybuje ve vložce válce, která má kónický tvar – nahoře má menší průměr než dole. Píst, který nemá pístní kroužky, má větší průměr, než je průměr vložky válce v horní úvrati. Píst tak těsní jen v horní úvrati a ve zbytku dráhy se pohybuje jen s minimálním odporem. Proto se u nového motoru může zdát, že píst v horní úvrati drhne, což však není závada. Za běhu motoru je horní část válce teplejší než spodní, při normálních provozních teplotách se tedy válec rovná a vůle mezi pístem a válcem jsou správné. Na obr. 13 vlevo lze vidět nespouštěný motor a vpravo motor zahřátý na provozní teploty.



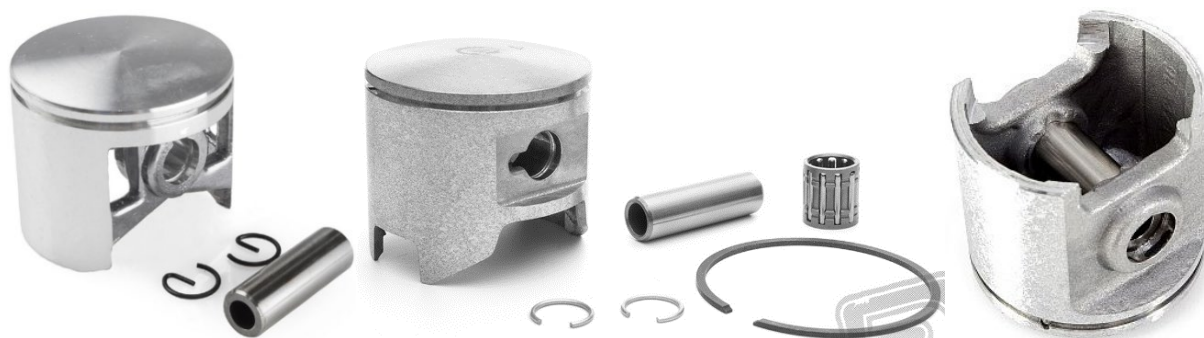
Obr. 13 Provedení pístu bez pístních kroužků [16]

Rozeznáváme zde čtyři základní možnosti provedení těchto vložek, lišící se použitým materiálem vložky a typem povrchové úpravy [16].

- ABC – Píst je vyroben z hliníkové slitiny, vložka je z mosazi s chromovanou pracovní plochou
- ABN – Levnější varianta uspořádání ABC, kdy je dražší chrom nahrazen levnějším niklem. Chrom má však hladší povrch a tedy menší tření.
- AAC – Píst je opět z hliníkové slitiny, pracovní chromovaná plocha přímo v odlitku válce z hliníkové slitiny, nebo je použita hliníková vložka s chromovanou pracovní plochou
- AAN – Podobné, co uspořádání AAC, jen je místo chromu použit nikl

2.5.3 PÍSTNÍ SKUPINA

Pístní skupinu tvoří samotný píst, pístní kroužky, pístní čep a pojistky pístního čepu. Jak již bylo zmíněno, písty pro vložky válců s kónickým tvarem nemají pístní kroužky, jsou pouze opatřeny po obvodě mazací drážkou. Při použití cylindrické vložky válce mívají písty téměř vždy jeden pístní kroužek vyrobený z legované šedé litiny. Použití pouze jednoho pístního kroužku je kvůli minimalizování tření kroužků o válec, což je u motorů největší mechanickou ztrátou, na úkor menší těsnosti pístu ve válci (ztráty komprese) a horšího přestupu tepla na stěnu válce. V důsledku menších třecích sil se válec méně zahřívá, dochází tedy k jeho menší deformaci. Některé motory o vyšších objemech (nad 5 cm³) mívají i dva pístní kroužky. Písty se vyrábějí z hliníkových slitin, což zaručí malou tepelnou roztažnost a tím i snížení tření ve válci. Pístní čep bývá vyroben jako obrobek z oceli, pro motory menších objemů plný, pro větší motory dutý, aby se ušetřila hmotnost. Proti axiálnímu vysunutí bývá zajištěn drátěnými pojistnými kroužky, různými podložkami z teflonu či hliníku a u větších motorů za pomoci segerových kroužků [14].



Obr. 14 Různá provedení pístní skupiny motorů [15]

2.5.4 OJNICE

Vyrábí se zpravidla z hliníkové slitiny tlakovým odléváním nebo zápusťkovým kováním za studena. Některé ojnice se také vyrábí obráběním. Ojnice bývají opatřeny dvojicí bronzových kluzných ložisek (v hlavě a v oku), pro mazání slouží mazací otvory vedené v ojnici nebo mazací drážky. Některé ojnice dražších a větších motorů mají buď jen v hlavě, nebo v hlavě i v oku umístěna jehlová jednořadá ložiska [14].



Obr. 15 Různá provedení ojníc motorů [15]

2.5.5 KLIKOVÝ HŘÍDEL

Klikový hřídel bývá vyroben z jednoho kusu z oceli, funkční plochy jsou broušeny na velmi přesné rozměry. Bývá uložen v klikové skříni (karteru). Levnější a méně výkonné motory mají klikový hřídel uložen kluzně přímo v klikové skříni, výkonnější a dražší motory mají klikový hřídel uložen většinou ve dvou valivých ložiskách. Ke spojení hlavního a ojnicního čepu slouží rameno klikového hřídele, které má také za úkol částečně vyvážit rotující hmoty. Klikové hřídele čtyřdobých motorů (obr. 16 vpravo) mají oproti dvoudobým vytvořené ozubení, které slouží pro pohon vačkového hřídele. Ten bývá zpravidla umístěn napříč vzhledem ke klikovému hřídeli. Vzniklý mimoběžný převod je navržen tak, aby se vačkový hřídel otáčel polovičními otáčkami klikového hřídele. Klikové hřídele dvoudobých motorů (obr. 16 vlevo) mají v případě použití takzvaného předního sání ve středu klikového hřídele vyfrézovanou drážku a od toho místa až po rameno je část hřídele dutá. Takto vzniklý dutý hřídel funguje jako šoupátko, řídí sání motoru a tím umožňuje plnění klikové skříně směsí paliva a vzduchu. Vpředu je klikový hřídel ukončen závitem pro matici a podložku, nebo vnitřním závitem pro šroub pro spojení s dalším zařízením, například vrtulí nebo převodovkou [14].



Obr. 16 Různá provedení klikových hřídelů motorů [15]

2.5.6 KLIKOVÁ SKŘÍŇ

Jedná se o základní díl celého motoru, vyrobený odléváním z hliníkových slitin. Odlitky se povrchově upravují pískováním, eloxováním a dalšími technologiemi. Skříň má oddělitelné přední a zadní víko. U dvoudobých motorů se ke skříni připojuje karburátor, a to dvěma způsoby. U takzvaných motorů s předním sáním je na skříni náletek pro připevnění karburátoru a rozvod sání probíhá tak, jak bylo popsáno v podkapitole 2.5.5. U motorů se zadním sáním je karburátor přišroubován k zadnímu průchozímu víčku. Za víčkem se nachází otočné kotoučové šoupátko, které řídí rozvod sání. Šoupátka se vyrábí z různých materiálů – oceli, hliníku či plastů. U některých motorů je použit rozvod sání membránou (jazýčkovým ventilem). Komora s tělesem membrán se umístí mezi motor a karburátor k zadní straně motoru. Membrány jsou vyrobeny z pérového bronzu, ocelové planžety či odolných plastů [14].

2.6 BUDOUCNOST POHONŮ – ALTERNATIVNÍ ZDROJE

Do budoucnosti mají na další vývoj motorů velký vliv požadavky na ochranu životního prostředí. Soudobé motory vypouštějí do ovzduší množství zdraví škodlivých látek. Ve velkých městech a v místech s hustým provozem dosahují tyto koncentrace vysokých hodnot. Jde o množství oxidu uhelnatého (CO), nespálených uhlovodíků (C_mH_n) a oxidů dusíku (NO_x). Na člověka i vegetaci působí škodlivě i další emise, obsahující olovo, síru apod. Proto se hledá jiný zdroj energie, který by nepůsobil nepříznivě na životní prostředí.

2.6.1 POHON POMOCÍ ROZKLADU NA VODÍK A KYSLÍK

V poslední době je pozornost obrácena k vodě a jejímu rozkladu na vodík a kyslík ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$). Voda totiž v sobě ukrývá jak výborné palivo – vodík, tak i nutnou složku na hoření – kyslík. Problémů je ale mnoho – vodík velmi rád vybuchuje a je velmi nesnadné vytvořit mu prostředí, ve kterém by nebyl výbušný a přitom se dal plynule a to dle potřeby odebírat. Zkoušky jsou prováděny, ale mají mnoho otazníků nejen technického charakteru.

2.6.2 PARNÍ POHON

Pozornost se věnovala taktéž parnímu pohonu – tedy konkrétně pístovému parnímu stroji a také parní turbíně. Hlavním důvodem je zlepšení ekologie, neboť tyto stroje nemají škodlivé exhalace. Problém však tkví v tom, že pára se nemůže vyfukovat do ovzduší jako u

parních strojů v minulosti, protože by spotřeba vody byla vysoká. Páru je potřeba nechat zkondenzovat a potom znovu ji ve stavu kapalném přivést do oběhu. Nutnost zařazení kondenzátoru zvýší rozměry i hmotnost celého stroje. Navíc – běžná voda nevyhovuje, neboť mrzne.

2.6.3 POHON JINÝMI ZDROJI

Mezi jiné – ostatní zdroje možných budoucích energií, či pohonů je možné uvažovat s využitím sluneční energie a její přeměnou na mechanickou energii, či jiných alternativních zdrojů energie.

2.7 POROVNÁNÍ ELEKTRICKÉHO A SPALOVACÍHO POHONU

Při porovnání dvou nejvíce používaných pohonů budou na jedné straně stát elektrické drony z podkapitoly 1.1.1. a na straně druhé zadaná předloha pro vlastní návrh motoru – žhavicí spalovací motor viz obr. 17 v kapitole třetí. Jak je z výčtu dronů s elektrickým pohonem patrné, jejich vybavení (zejména kapacita a tím i hmotnost akumulátoru) a dolet se liší podle druhu nasazení daného prostředku. Zatímco drony určené pro běžné uživatele (pro filmování, fotografování, zábavu...) jsou vybaveny akumulátory o kapacitě v řádu jednotek ampérhodin a jejich deklarovaná doba doletu se pohybuje běžně v rozmezí 15 až 30 minut, drony využívané pro mapování, průzkum, logistiku,... bývají vybaveny akumulátory s kapacitami v řádu desítek ampérhodin, což prodlužuje jejich dobu doletu.

Naproti tomu spalovací motory v sobě skrývají vysokou energetickou hustotu uloženou v uhlovodíkovém palivu. Výrobci motorů zvlášť u každého motoru uvádí doporučenou velikost palivové nádrže a dobu provozu, na kterou plná nádrž průměrně vystačí (pokud motor neběží stále na plný plyn). Je důležité zdůraznit, že udávaná doba provozu platí pro rozměrovou kategorii strojů, pro kterou je daný motor (jeho výkon) určen. Doporučená velikost nádrže se pochopitelně odlišuje pro daný objem motoru (vyšší objem motoru znamená větší nádrž) a také pro dvoudobý či čtyřdobý motor, kdy dvoudobý z důvodu vyšší spotřeby paliva potřebuje větší objem nádrže. Spotřeba se u žhavicích čtyřdobých motorů o objemech do 5 cm³ pohybuje zhruba do 10 ml paliva na 1 minutu letu. Pro zadanou předlohu zdroj [13] uvádí doporučený objem nádrže 100 až 170 ml, kdy na 100 ml nádrž je motor schopen 12 až 13 minutového provozu. Hmotnost celého motoru činí 275 g.

Tab. 2 Porovnání elektrického a spalovacího pohonu

	Hmotnost akumulátoru/ Hmotnost motoru	Kapacita akumulátoru/ Objem nádrže paliva	Dolet [min]
Elektropohon A	2 · 515 g	2 · 4280 mAh	27
Elektropohon B	600 g	5550 mAh	15
Elektromotor C	1985 g	16000 mAh	40
Spalovací motor	275 g	100 ml	12

V tab. 2 je možné vidět vzájemné porovnání obou druhů pohonů. Druhý sloupec tabulky ukazuje hmotnostní charakteristiky – jedná se o nehmotnější části daného pohonu, tedy v případě elektrického hmotnost akumulátoru (hmotnost elektrického motoru a regulátoru motoru je zanedbána) a v případě spalovacího hmotnost motoru (zde je zanedbána hmotnost palivové nádrže s jejím obsahem). Třetí sloupec tabulky vyjadřuje pomyslné množství energie, které si daný stroj nese s sebou a čtvrtý sloupec to, co nás zajímá nejvíce, a to je právě dolet stroje. Spalovací motor nabízí paradoxně nejkratší dobu doletu, ale je třeba si uvědomit, že motor pracuje s nádrží o objemu 100 ml, při zařazení 5krát větší nádrže se s dobou doletu lze dostat na zhruba 1 hodinu.

Na závěr této kapitoly a jako motivaci pro návrh spalovací motoru pro autonomní prostředky menších rozměrů je tedy fakt, že existuje alternativa pro v drtivé většině používané elektromotory, která navíc může nabídnout i zlepšení doby doletu nebo i hmotnost dronu při použití moderních lehkých materiálů (hliníkových slitin) a v neposlední řadě vyšší nosnost. Pro motorové nadšence je zde navíc bonus v podobě charakteristického zvuku spalovacího motoru.

3 VLASTNÍ NÁVRH MOTORU

Návrh a výpočet jednotlivých částí motoru budou provedeny podle následující předlohy – čtyřtakového zážehového (žhavicího) motoru od výrobce FSP. Výpočet vychází z požadovaného zdvihového objemu motoru, a to do pěti kubických centimetrů.



Obr. 17 Motor FSP FS 30AR [13]

3.1 NÁVRH ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ MOTORU

Výrobce pro motor na obr. 17 uvádí hodnotu efektivního výkonu při jmenovitých otáčkách, které budou použity pro návrh základních parametrů vlastního motoru.

Efektivní výkon motoru $P_e = 400 \text{ W}$,

Jmenovité otáčky motoru $n = 9500 \text{ min}^{-1}$,

Počet válců motoru $i = 1$,

Taktnost motoru $\tau = 0,5$.

Pro motor dvoudobý je $\tau = 1$ a pro motor čtyřdobý je $\tau = 0,5$.

3.1.1 URČENÍ STŘEDNÍHO INDIKOVANÉHO TLAKU

Označíme-li kladnou práci oběhu A_o , kterou motor vykoná, pak lze též konstatovat, že stejnou práci vykoná také neměnní se síla působící po dráze zdvihu. Aby byla síla konstantní, pak musí být i konstantní tlak plynů, které působí na píst. Tento pomyslný tlak se nazývá střední indikovaný tlak oběhu p_i a lze dokázat, že stejná práce oběhu A_o se dá také vyjádřit jako součin středního indikovaného tlaku a zdvihového objemu válce motoru. Střední indikovaný tlak oběhu tedy vyjadřuje dokonalost spalování paliva skrz využitý zdvihový objem motoru. Čím je indikovaný tlak vyšší, tím více práce dostaneme z jednotky zdvihového objemu. Tab. 3 nám udává základní parametry porovnávacího motoru, u kterého bylo dosaženo postupnými modifikacemi různě velkých hodnot těchto parametrů. Protože požadavek na náš motor jsou co

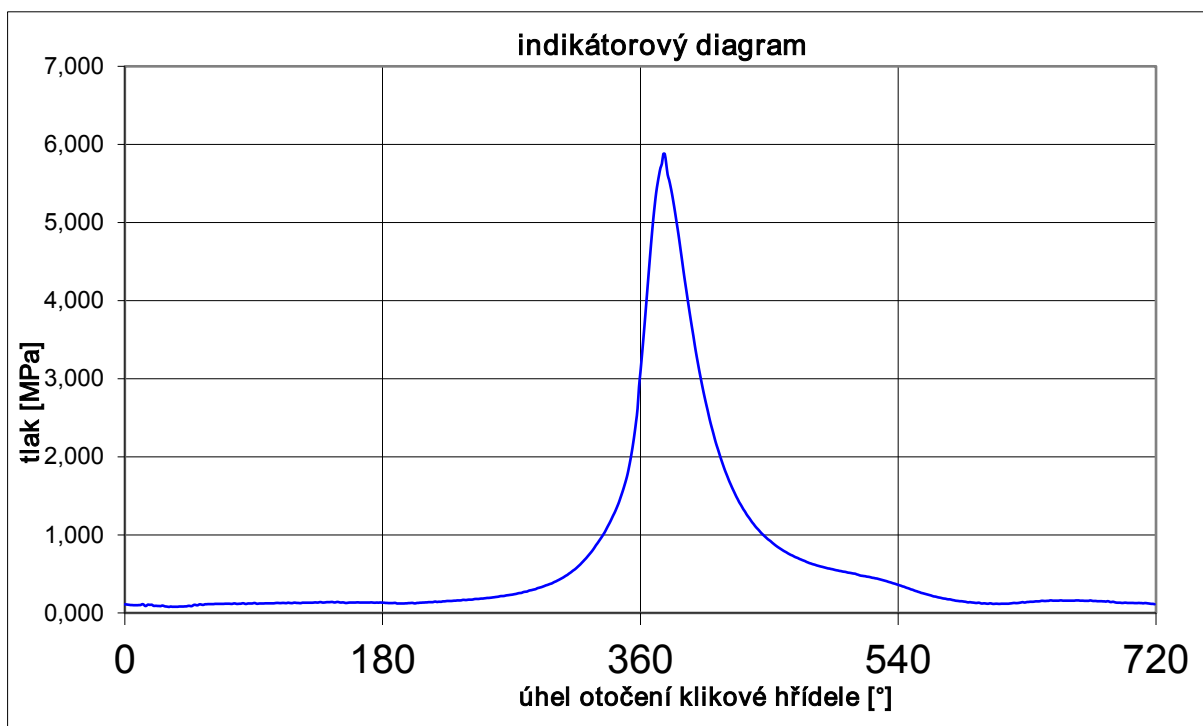
nejmenší rozměry spojené s velmi malým zdvihovým objemem, je volena z tab. 3 nejvyšší uvedená hodnota středního indikovaného tlaku ze souboru č. 8:

$$p_i = 1,28 \text{ MPa.}$$

Tab. 3 Hodnoty středního indikovaného a efektivního tlaku

Soubor č.	1	2	3	4	5	6	7	8
Celková práce oběhu [J]	272,72	283,58	307,54	338,39	381,24	386,03	400,94	423,11
Střední indikovaný tlak [MPa]	0,82	0,85	0,92	1,02	1,15	1,16	1,21	1,28
Střední efektivní tlak [MPa]	0,64	0,66	0,72	0,79	0,89	0,91	0,94	1,00

Tab. 3 vychází z obr. 18, jež nám dává závislost naměřeného tlaku ve válci na úhlu natočení klikového hřídele. Jedná se o modifikaci diagramu tlak – objem, vyjadřující podobné vlastnosti. Obr. 18 je vykreslen z měření na porovnávacím motoru ze souboru hodnot č. 8. Z obr. 18 je také možné zjistit nejvyšší absolutní tlak naměřený ve válci, který odpovídá hodnotě 5,877 MPa, při úhlu otočení klikového hřídele 377°.



Obr. 18 Indikátorový diagram čtyřdobého zážehového motoru

3.1.2 URČENÍ STŘEDNÍHO EFEKTIVNÍHO TLAKU

Hodnota středního efektivního tlaku oběhu p_e vyjadřuje podobnou skutečnost co p_i , jen je zmenšená o mechanické ztráty motoru. Platí vztah:

$$p_e = p_i \cdot \eta_m \text{ [MPa]}, \quad (1)$$

kde:

η_m ...mechanická účinnost motoru [-].

Mechanická účinnost se u zážehových motorů pohybuje v rozmezí od 0,75 do 0,92 [2]. Podíl jednotlivých ztrát v procentech je uveden v tab. 4. Mechanická účinnost je závislá na druhu motoru, zejména jeho rychloběžnosti, dokonalosti jeho technologického provedení, viskozity mazacího oleje a provozním stavu, zejména teplotě motoru. Mechanická účinnost klesá s rostoucími otáčkami a rostoucími pracovními tlaky, ale roste se zatížením [4].

Tab. 4 Podíl mechanických ztrát v % ztrátového výkonu [2]

ZTRÁTY	BENZINOVÝ MOTOR [%]	NAFTOVÝ MOTOR [%]
tření píst - válec (kroužky - válec)	45	50
tření ložisek klikového a vačkového hřídele	23	24
ztráty na výměně náplně válce motoru (výfuk, sání)	20	14
pohon rozvodového mechanismu	6	6
pohon pomocných agregátů	6	6

Pro naše výpočty postačí, bude-li se uvažovat mechanická účinnost η_m asi 0,8. Hodnota p_e se pak podle vzorce (1) bude pohybovat kolem 1 MPa, přičemž tu stejnou hodnotu uvádí i tab. 3.

3.1.3 URČENÍ ZDVIHOVÉHO POMĚRU

Veličina zdvihový poměr k je zaváděna z důvodu zjednodušení některých výpočtů uvedených dále. Platí pro ni vztah:

$$k = \frac{Z}{D} [-], \quad (2)$$

kde:

Z ...zdvih pístu motoru [mm],

D ...velikost vrtání válce [mm].

Tab. 5 Hodnoty zdvihového poměru [1]

Typ motoru	Hodnota
čtyřdobý benzínový motor nepřepřlňovaný	0.75 ÷ 1.2
čtyřdobý benzínový motor přepřlňovaný	0.70 ÷ 1.1
čtyřdobý naftový motor	0.90 ÷ 1.2

Maloobjemové spalovací motory jsou navrhovány tak, že velikost zdvihu bývá menší než velikost vrtání válce, tedy zdvihový poměr je menší než jedna. Proto na základě tab. 5 byla zvolena hodnota zdvihového poměru:

$$k = 0,8.$$

3.1.4 VÝPOČET ZDVIHOVÉHO OBJEMU VÁLCE

Pro efektivní výkon pístového motoru platí vztah:

$$P_e = p_e \cdot V_Z \cdot \frac{n}{60} \cdot i \cdot \tau \text{ [W]} \quad (3)$$

Z rovnice (3) lze odvodit vzorec pro určení zdvihového objemu válce:

$$V_Z = \frac{60 \cdot P_e}{p_e \cdot n \cdot i \cdot \tau} \text{ [m}^3\text{]} \quad (4)$$

$$V_Z = \frac{60 \cdot 400 \text{ W}}{1 \cdot 10^6 \text{ MPa} \cdot 9500 \text{ min}^{-1} \cdot 1 \cdot 0,5}$$

$$V_Z = 5,053 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 5,053 \text{ cm}^3$$

Výsledná hodnota zdvihového objemu přibližně odpovídá zadání, tedy návrhu spalovacího motoru do objemu 5 kubických centimetrů. Mírný přesah nebude ničemu vadit.

3.1.5 VOLBA KOMPRESNÍHO POMĚRU A VÝPOČET KOMPRESNÍHO OBJEMU

Pro kompresní poměr platí následující vztah:

$$\varepsilon = \frac{V_Z + V_K}{V_K} [-], \quad (5)$$

kde hodnota V_Z je již spočtena a symbol V_K – kompresní objem vyjadřuje pracovní objem v hlavě válce motoru při poloze pístu v horní úvratí. Kompresní poměr se u maloobjemových zážehových nepřepřehovaných motorů obvykle pohybuje v rozmezí $7,5 \div 9$ [21]. Na základě doporučených hodnot byl zvolen kompresní poměr $\varepsilon = 8$. Z rovnice (5) je možné dále vyjádřit skutečnou hodnotu kompresního objemu.

$$V_K = \frac{V_Z}{\varepsilon - 1} \text{ [cm}^3\text{]} \quad (6)$$

$$V_K = \frac{5,053 \text{ cm}^3}{8 - 1}$$

$$V_K = 0,722 \text{ cm}^3$$

3.1.6 ZDVIHOVÝ OBJEM MOTORU

$$V_M = V_Z \cdot i \text{ [cm}^3\text{]} \quad (7)$$

$$V_M = 5,053 \text{ cm}^3 \cdot 1$$

$$V_M = 5,053 \text{ cm}^3$$

3.1.7 VÝPOČET LITROVÉHO VÝKONU

$$P_l = \frac{P_e}{V_M} [\text{kW} \cdot \text{l}^{-1}] \quad (8)$$

$$P_l = \frac{400 \text{ W}}{5,053 \text{ cm}^3}$$

$$P_l = 79,167 \text{ kW} \cdot \text{l}^{-1}$$

Literatura [5] uvádí hodnoty litrového výkonu u maloobjemových vysokootáčkových motorů až do $100 \text{ kW} \cdot \text{l}^{-1}$ – pohybujeme se v daném rozmezí.

3.1.8 VELIKOST VRTÁNÍ VÁLCE

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_Z}{\pi \cdot k}} [\text{mm}] \quad (9)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 5,053 \cdot 10^3 \text{ mm}^3}{\pi \cdot 0,8}}$$

$$D = 20,035 \text{ mm} - \text{je voleno vrtání } D = 20 \text{ mm}$$

3.1.9 VELIKOST ZDVIHU

Z rovnice (2) pro velikost zdvihu platí vztah:

$$Z = k \cdot D [\text{mm}] \quad (10)$$

$$Z = 0,8 \cdot 20 \text{ mm}$$

$$Z = 16 \text{ mm}$$

3.1.10 VÝPOČET STŘEDNÍ PÍSTOVÉ RYCHLOSTI

$$c_s = 2 \cdot Z \cdot \frac{n}{60} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

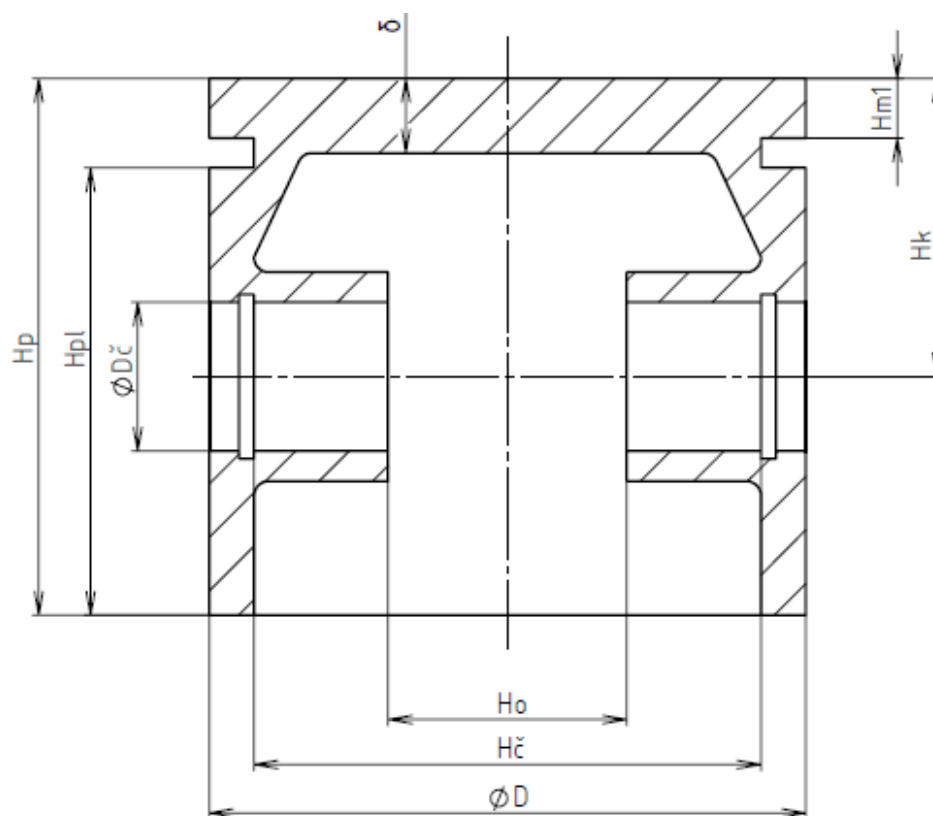
$$c_s = 2 \cdot 16 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \frac{9500}{60} \text{ s}^{-1}$$

$$c_s = 5,067 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední pístová rychlost by u zážehových motorů neměla překročit hodnotu $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [1], jinak by se musel výpočet motoru zastavit a zopakovat. Tato podmínka je splněna.

3.2 NÁVRH HLAVNÍCH ROZMĚRŮ PÍSTU

Při návrhu pístu se vychází z již prověřených a osvědčených závislostí, kde řídicí veličinou je velikost vrtání válce, jehož hodnota je již určena. Existují dva základní postupy při návrhu, lze vyjít buď z empirických vztahů, nebo z diagramů pro určení rozměrů pístu. Při návrhu bude použita první z uvedených možností.



Obr. 19 Hlavní rozměry pístu

Tab. 6 Charakteristiky rozměrů pístu [1]

Veličina	Značka	%D
Vrtání válce	D	100
Výška pístu	H_p	90÷140
Výška pláště pístu	H_{pl}	55÷60
Kompresní výška pístu	H_k	50÷70
Vzdálenost mezi nálitky pístního čepu	H_o	40
Vzdálenost segerových kroužků	$H_{\check{c}}$	85
Průměr pístního čepu	$D_{\check{c}}$	25÷28
Výška prvního můstku	H_{m1}	6÷10
Tloušťka dna pístu	δ	5÷7

3.2.1 VÝŠKA PÍSTU

$$H_p = (0,9 \div 1,4) \cdot D \text{ [mm]} \quad (12)$$

$$H_p = (0,9 \div 1,4) \cdot 20 \text{ mm}$$

$$H_p = 18 \div 28 \text{ mm} - \text{byla zvolena hodnota } H_p = 18 \text{ mm}$$

3.2.2 VÝŠKA PLÁŠTĚ PÍSTU

$$H_{pl} = (0,55 \div 0,6) \cdot D \text{ [mm]} \quad (13)$$

$$H_{pl} = (0,55 \div 0,6) \cdot 20 \text{ mm}$$

$H_{pl} = 11 \div 12 \text{ mm}$ – z důvodu použití jednoho pístních kroužků (nejběžnější spalovací motory mají tři, což nepatrně snižuje výšku pláště) byla zvolena hodnota $H_{pl} = 15 \text{ mm}$

3.2.3 KOMPRESNÍ VÝŠKA PÍSTU

$$H_k = (0,5 \div 0,7) \cdot D \text{ [mm]} \quad (14)$$

$$H_k = (0,5 \div 0,7) \cdot 20 \text{ mm}$$

$$H_k = 10 \div 14 \text{ mm} - \text{byla zvolena hodnota } H_k = 10 \text{ mm}$$

3.2.4 VZDÁLENOST MEZI NÁLITKY PÍSTNÍHO ČEPU

$$H_o = 0,4 \cdot D \text{ [mm]} \quad (15)$$

$$H_o = 0,4 \cdot 20 \text{ mm}$$

$$H_o = 8 \text{ mm}$$

3.2.5 VZDÁLENOST SEGEROVÝCH KROUŽKŮ

$$H_{\varepsilon} = 0,85 \cdot D \text{ [mm]} \quad (16)$$

$$H_{\varepsilon} = 0,85 \cdot 20 \text{ mm}$$

$$H_{\varepsilon} = 17 \text{ mm}$$

V našem případě pro axiální zajištění čepu nebudou použity segerovy kroužky, ale drátěné pojistné kroužky, viz obr. 14.

3.2.6 PRŮMĚR PÍSTNÍHO ČEPU

$$D_{\varepsilon} = (0,25 \div 0,28) \cdot D \text{ [mm]} \quad (17)$$

$$D_{\varepsilon} = (0,25 \div 0,28) \cdot 20 \text{ mm}$$

$D_{\varepsilon} = 5 \div 5,6 \text{ mm}$ – z důvodu použití kluzného ložiska v oku ojnice o vnitřním průměru 6 mm byla zvolena hodnota $D_{\varepsilon} = 6 \text{ mm}$

3.2.7 VÝŠKA PRVNÍHO MŮSTKU

$$H_{m1} = (0,06 \div 0,1) \cdot D \text{ [mm]} \quad (18)$$

$$H_{m1} = (0,06 \div 0,1) \cdot 20 \text{ mm}$$

$$H_{m1} = 1,2 \div 2 \text{ mm} - \text{byla zvolena hodnota } H_{m1} = 2 \text{ mm}$$

3.2.8 TLOUŠŤKA DNA PÍSTU

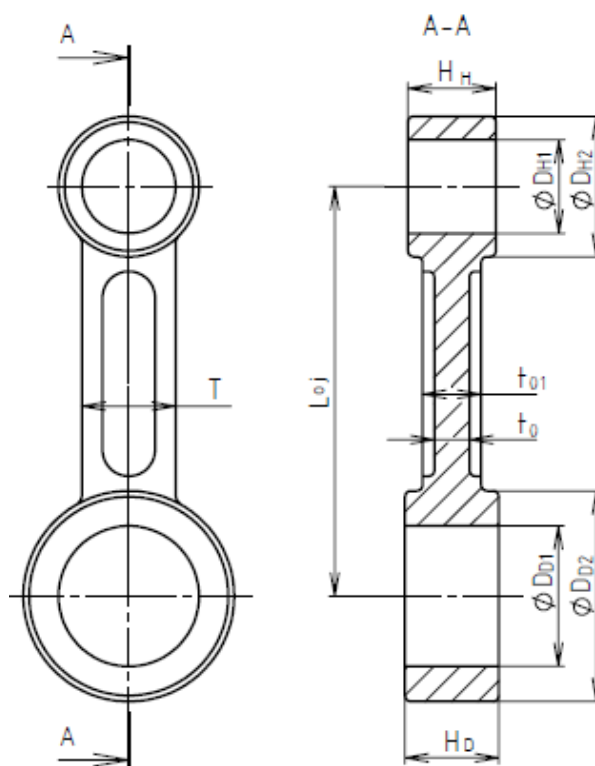
$$\delta = (0,05 \div 0,07) \cdot D \text{ [mm]} \quad (19)$$

$$\delta = (0,05 \div 0,07) \cdot 20 \text{ mm}$$

$$\delta = 1 \div 1,4 \text{ mm} - \text{z bezpečnostních důvodů (viz podkapitola 4.1) byla zvolena hodnota } \delta = 2,5 \text{ mm}$$

3.3 NÁVRH HLAVNÍCH ROZMĚRŮ OJNICE

Rozměry ojnice budou určeny obdobně jako rozměry pístu, vyjdeme tedy z osvědčených empirických vztahů, které budou funkcí velikosti vrtání válce.



Obr. 20 Hlavní rozměry ojnice [1]

Tab. 7 Charakteristiky rozměrů ojnice [1]

Veličina	Značka	Rozměr
Délka ojnice	L_{oj}	$(1,70 \div 2,30) D$
Šířka ojnice	T	$(0,26 \div 0,30) D$
Vnitřní průměr oka ojnice	ϕD_{H1}	$(0,28 \div 0,5) D$
Vnější průměr oka ojnice	ϕD_{H2}	$1,5 D_{H1}$
Šířka oka ojnice	H_H	$(0,35 \div 0,38) D$
Vnitřní průměr hlavy ojnice	ϕD_{D1}	$(0,60 \div 0,75) D$
Vnější průměr hlavy ojnice	ϕD_{D2}	$1,5 D_{D1}$
Šířka hlavy ojnice	H_D	$(0,40 \div 0,45) D$
Tloušťka ojnice	t_{o1}	$(10 \div 25) \text{ mm}$
Tloušťka dřívku ojnice	t_o	$(3 \div 8) \text{ mm}$

3.3.1 DÉLKA OJNICE

$$L_{oj} = (1,7 \div 2,3) \cdot D \text{ [mm]} \quad (20)$$

$$L_{oj} = (1,7 \div 2,3) \cdot 20 \text{ mm}$$

$$L_{oj} = 34 \div 46 \text{ mm} - \text{byla zvolena hodnota } L_{oj} = 35 \text{ mm}$$

3.3.2 ŠÍŘKA OJNICE

$$T = (0,26 \div 0,3) \cdot D \text{ [mm]} \quad (21)$$

$$T = (0,26 \div 0,3) \cdot 20 \text{ mm}$$

$$T = 5,2 \div 6 \text{ mm} - \text{z bezpečnostních důvodů byla zvolena hodnota } T = 8 \text{ mm}$$

3.3.3 VNITŘNÍ PRŮMĚR OKA OJNICE

$$D_{H1} = (0,28 \div 0,5) \cdot D \text{ [mm]} \quad (22)$$

$$D_{H1} = (0,28 \div 0,5) \cdot 20 \text{ mm}$$

$$D_{H1} = 5,6 \div 10 \text{ mm} - \text{byla zvolena hodnota } D_{H1} = 8 \text{ mm}$$

S použitím kluzného ložiska se vnitřní průměr zredukuje na 6 mm, což odpovídá průměru pístního čepu.

3.3.4 VNĚJŠÍ PRŮMĚR OKA OJNICE

$$D_{H2} = 1,5 \cdot D_{H1} [\text{mm}] \quad (23)$$

$$D_{H2} = 1,5 \cdot 8 \text{ mm}$$

$$D_{H2} = 12 \text{ mm}$$

3.3.5 ŠÍŘKA OKA OJNICE

$$H_H = (0,35 \div 0,38) \cdot D [\text{mm}] \quad (24)$$

$$H_H = (0,35 \div 0,38) \cdot 20 \text{ mm}$$

$$H_H = 7 \div 7,6 \text{ mm} - \text{byla zvolena hodnota } H_H = 7,5 \text{ mm}$$

3.3.6 VNITŘNÍ PRŮMĚR HLAVY OJNICE

$$D_{D1} = (0,6 \div 0,75) \cdot D [\text{mm}] \quad (25)$$

$$D_{D1} = (0,6 \div 0,75) \cdot 20 \text{ mm}$$

$D_{D1} = 12 \div 15 \text{ mm}$ – byla zvolena hodnota $D_{D1} = 12 \text{ mm}$. S použitím kluzného ložiska se vnitřní průměr zredukuje na 10 mm, což odpovídá průměru ojnicního čepu.

3.3.7 VNĚJŠÍ PRŮMĚR HLAVY OJNICE

$$D_{D2} = 1,5 \cdot D_{D1} [\text{mm}] \quad (26)$$

$$D_{D2} = 1,5 \cdot 12 \text{ mm}$$

$$D_{D2} = 18 \text{ mm}$$

3.3.8 ŠÍŘKA HLAVY OJNICE

$$H_D = (0,4 \div 0,45) \cdot D [\text{mm}] \quad (27)$$

$$H_D = (0,4 \div 0,45) \cdot 20 \text{ mm}$$

$$H_D = 8 \div 9 \text{ mm} - \text{byla zvolena hodnota } H_D = 8 \text{ mm}$$

3.3.9 TLOUŠŤKA OJNICE

$$t_{o1} = (10 \div 25) [\text{mm}] \quad (28)$$

Z důvodu malých rozměrů motoru byla zvolena hodnota $t_{o1} = 5 \text{ mm}$.

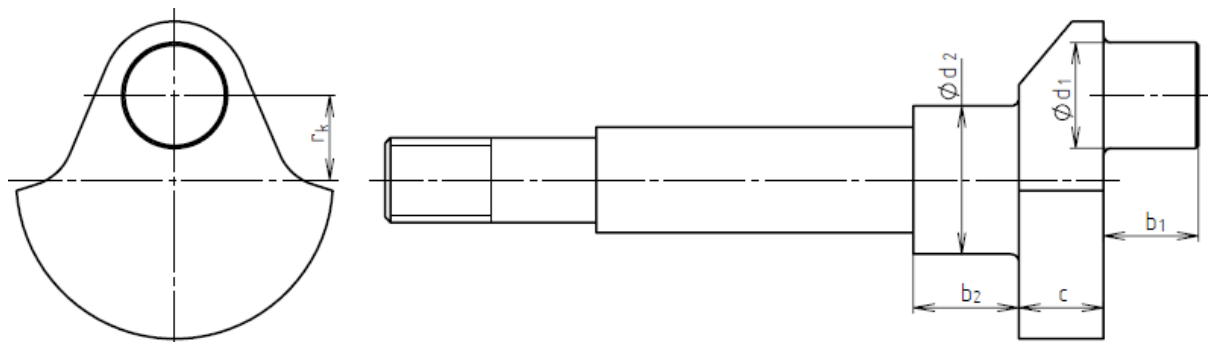
3.3.10 TLOUŠŤKA DŘÍKU OJNICE

$$t_o = (3 \div 8) [\text{mm}] \quad (29)$$

Byla zvolena hodnota $t_o = 3 \text{ mm}$.

3.4 NÁVRH HLAVNÍCH ROZMĚRŮ KLIKOVÉHO HŘÍDELE

Hlavní rozměry klikového hřídele budou opět určeny na základě stanovené velikosti vrtání válce podle empirických vztahů.



Obr. 21 Hlavní rozměry klikového hřídele

Tab. 8 Charakteristiky rozměrů klikového hřídele [1]

Veličina	Značka	%D
Průměr hlavního čepu	$\varnothing d_2$	60÷80
Šířka hlavního čepu	b_2	40÷60
Průměr ojničního čepu	$\varnothing d_1$	60÷70
Šířka ojničního čepu	b_1	40÷60
Šířka ramena kliky	c	20÷50

3.4.1 PRŮMĚR HLAVNÍHO ČEPU

$$d_2 = (0,6 \div 0,8) \cdot D \text{ [mm]} \quad (30)$$

$$d_2 = (0,6 \div 0,8) \cdot 20 \text{ mm}$$

$$d_2 = 12 \div 16 \text{ mm} - \text{byla zvolena hodnota } d_2 = 14 \text{ mm}$$

3.4.2 ŠÍŘKA HLAVNÍHO ČEPU

$$b_2 = (0,4 \div 0,6) \cdot D \text{ [mm]} \quad (31)$$

$$b_2 = (0,4 \div 0,6) \cdot 20 \text{ mm}$$

$$b_2 = 8 \div 12 \text{ mm} - \text{byla zvolena hodnota } b_2 = 10 \text{ mm}$$

3.4.3 PRŮMĚR OJNIČNÍHO ČEPU

$$d_1 = (0,6 \div 0,7) \cdot D \text{ [mm]} \quad (32)$$

$$d_l = (0,6 \div 0,7) \cdot 20 \text{ mm}$$

$d_l = 12 \div 14 \text{ mm}$ – z důvodu použití kluzného ložiska v hlavě ojnice o vnitřním průměru 10 mm byla zvolena hodnota $d_l = 10 \text{ mm}$.

3.4.4 ŠÍŘKA OJNÍČNÍHO ČEPU

$$b_l = (0,4 \div 0,6) \cdot D [\text{mm}] \quad (33)$$

$$b_l = (0,4 \div 0,6) \cdot 20 \text{ mm}$$

$b_l = 8 \div 12 \text{ mm}$ – byla zvolena hodnota $b_l = 10 \text{ mm}$

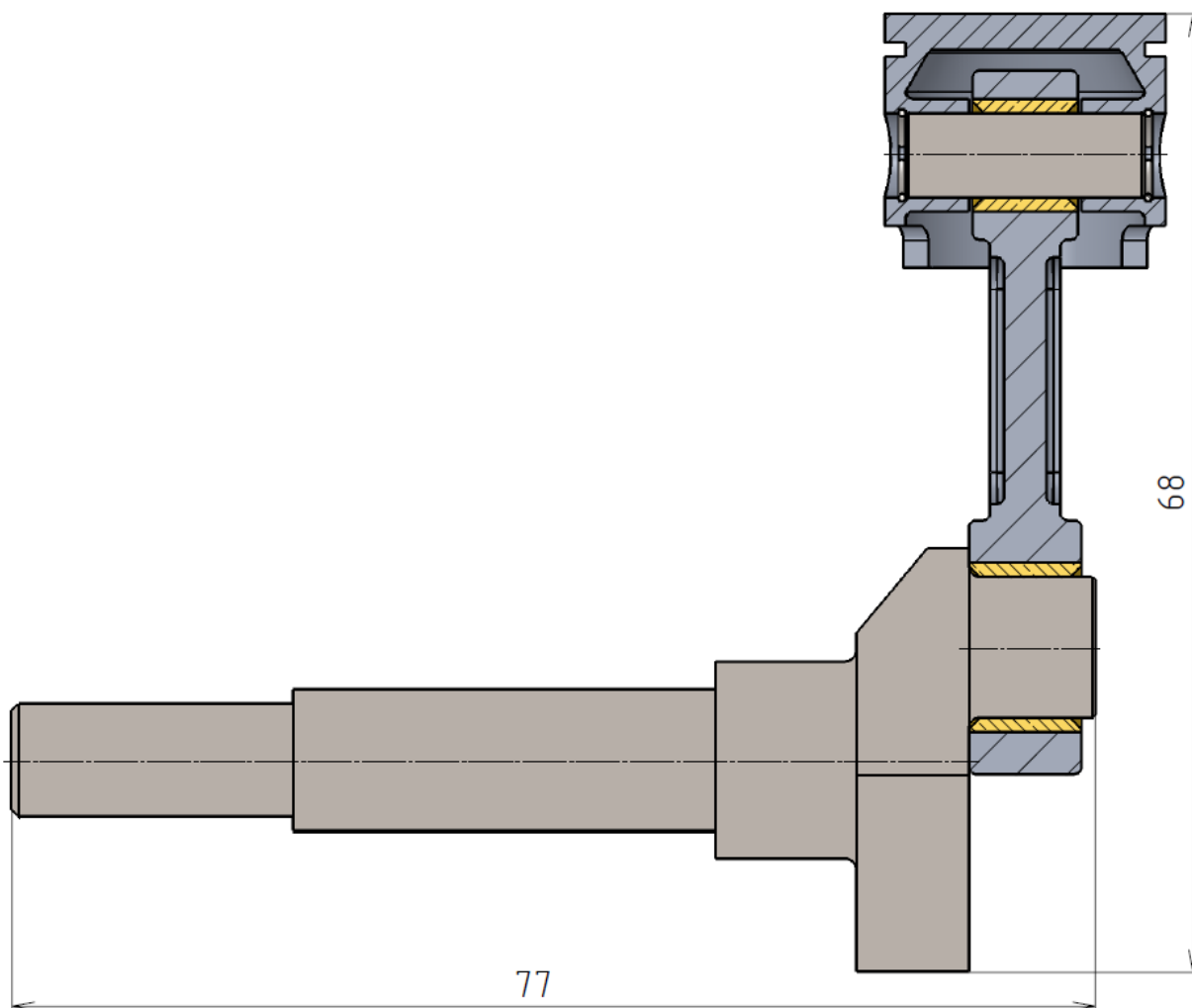
3.4.5 ŠÍŘKA RAMENA KLIKY

$$c = (0,2 \div 0,5) \cdot D [\text{mm}] \quad (34)$$

$$c = (0,2 \div 0,5) \cdot 20 \text{ mm}$$

$c = 4 \div 10 \text{ mm}$ – byla zvolena hodnota $c = 8 \text{ mm}$

Na závěr vlastního návrhu hlavních dílů motoru byly vytvořeny 3D modely těchto dílů a sestava z nich složená (klikové ústrojí) v programu Solidworks. Píst se nachází v horní úvratí. Obr. 22 je třeba brát pouze jako nástin, protože byla určena pouze část všech rozměrů a zbylé byly odhadnuty. Rovněž zde chybí mnoho důležitých detailů, které by už přesahovaly rozsah této bakalářské práce. Patří sem například otvory pro přívod mazacího oleje, vytvořené ozubení pro pohon vačkového hřídele, a jiné.



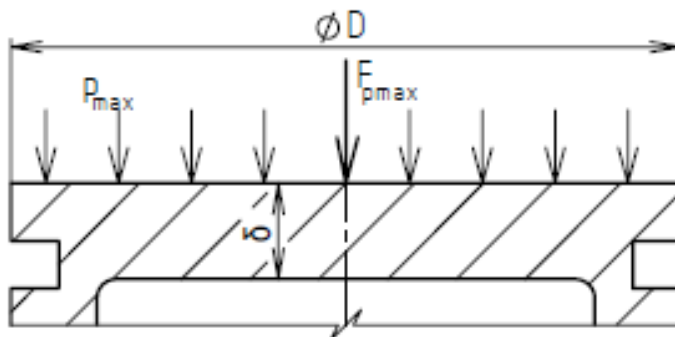
Obr. 22 Klikové ústrojí a celkové rozměry motoru

4 PEVNOSTNÍ VÝPOČET VYBRANÝCH ČÁSTÍ

Pozornost při výpočtech bude věnována zejména pístu, jakožto nejvíce namáhanému prvku motoru.

4.1 PEVNOSTNÍ VÝPOČET DNA PÍSTU

Vzhledem k příliš složitému tvarování pístu a také složitému proměnnému namáhání pístu je výpočet pouze informativní a je na základě namáhání od tlaku plynů, které působí při spalování zápalné směsi. Jsou tak zanedbány vlivy jako vrubové účinky, tepelný tok pístem či proměnnost zatěžujících účinků (zohledňuje je velikost dovolených napětí). Výpočet je zjednodušen na zatížení vetknuté nebo podepřené desky a je proveden na ohyb



Obr. 23 Spojité zatížení dna pístu od tlaku plynů

4.1.1 MAXIMÁLNÍ SÍLA OD TLAKU PLYNŮ

$$F_{pmax} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot p_{max} \text{ [N]} \quad (35)$$

$$F_{pmax} = \frac{\pi \cdot 20^2 \text{ mm}^2}{4} \cdot 5,877 \text{ MPa}$$

$$F_{pmax} = 1\,846,314 \text{ N}$$

Kde:

p_{max} ... maximální tlak vzniklý ve válci [MPa] – viz obr. 18.

4.1.2 MAXIMÁLNÍ OHYBOVÝ MOMENT

$$M_{o,max} = \frac{D}{6} \cdot \frac{F_{pmax}}{\pi} \text{ [N} \cdot \text{mm]} \quad (36)$$

$$M_{o,max} = \frac{10 \text{ mm}}{6} \cdot \frac{1\,846,314 \text{ N}}{\pi}$$

$$M_{o,max} = 1\,959 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

4.1.3 PRŮŘEZOVÝ MODUL V OHYBU

$$W_o = \frac{1}{6} \cdot D \cdot \delta^2 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (37)$$

$$W_o = \frac{1}{6} \cdot 20 \text{ mm} \cdot 2,5^2 \text{ mm}^2$$

$$W_o = 20,833 \text{ mm}^3$$

4.1.4 MAXIMÁLNÍ OHYBOVÉ NAPĚTÍ

$$\sigma_{o,max} = \frac{M_{o,max}}{W_o} \text{ [MPa]} \quad (38)$$

$$\sigma_{o,max} = \frac{1\,959 \text{ N} \cdot \text{mm}}{20,833 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{o,max} = 94,032 \text{ MPa}$$

Hodnota maximálního ohybového napětí je pro lineární model kruhové desky. Dna pístu zážehových motorů lze považovat za desku vetknutou, pro kterou platí následující vztah [1]:

4.1.5 MAXIMÁLNÍ OHYBOVÉ NAPĚTÍ NA VETKNUTOU DESKU

$$\sigma_{o,max} = 0,25 \cdot p_{max} \cdot \left(\frac{D}{2 \cdot \delta} \right)^2 \text{ [MPa]} \quad (39)$$

$$\sigma_{o,max} = 0,25 \cdot 5,877 \text{ MPa} \cdot \left(\frac{20 \text{ mm}}{2 \cdot 2,5 \text{ mm}} \right)^2$$

$$\sigma_{o,max} = 23,508 \text{ MPa}$$

Píst bude vyroben ze slitiny hliníku, pro kterou jsou v tab. 9 uvedeny hodnoty dovolených ohybových napětí. Pro jednoduchost a ušetřenou hmotnost budeme uvažovat dno bez žeber.

Tab. 9 Dovolená napětí pro písty z hliníkové slitiny [1]

dno bez žeber	dno s nízkými žebry
$\sigma_{dov} = 20 \text{ až } 25 \text{ [MPa]}$	$\sigma_{dov} = 40 \text{ až } 50 \text{ [MPa]}$

$$23,508 \text{ MPa} < 20 \div 25 \text{ MPa} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

4.2 NEJSLABŠÍHO MÍSTA PLÁŠTĚ PÍSTU – NAMÁHÁNÍ TLAKEM

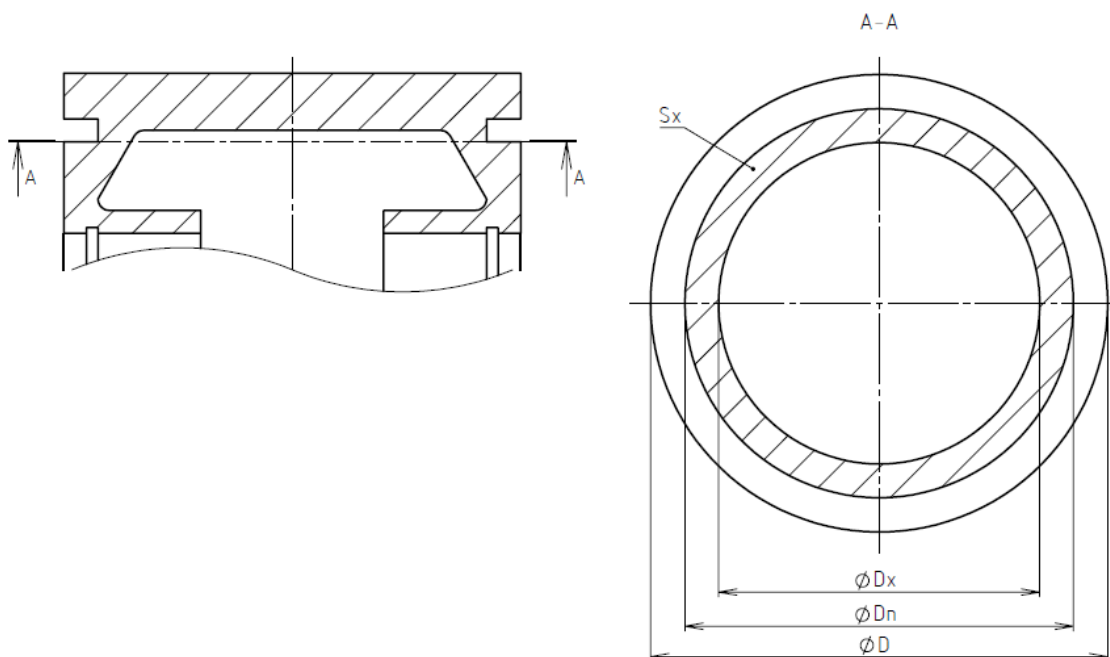
Nejslabší místo se nachází se v místě drážky pro pístní kroužek, kde je stěna pístu zeslabena drážkou pro kroužek.

4.2.1 PLOCHA NEJSLABŠÍHO MÍSTA PLÁŠTĚ PÍSTU

$$S_x = \frac{\pi}{4} \cdot (D_n^2 - D_x^2) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (40)$$

$$S_x = 70,54 \text{ mm}^2$$

Plocha byla vypočítána pomocí programu Solidworks – viz obr. 25.



Obr. 24 Nejslabší místo pláště pístu

4.2.2 MAXIMÁLNÍ TLAKOVÉ NAPĚTÍ

$$\sigma_{tl,max} = \frac{F_{pmax}}{S_x} \text{ [MPa]} \quad (41)$$

$$\sigma_{tl,max} = \frac{1\,846,314 \text{ N}}{70,54 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{tl,max} = 26,173 \text{ MPa}$$

Dovolená hodnota tlakových napětí se pro v současnosti používaná hliníkové slitiny pohybuje v rozmezí 30 ÷ 40 MPa [1].

$$26,173 \text{ MPa} < 30 \div 40 \text{ MPa} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

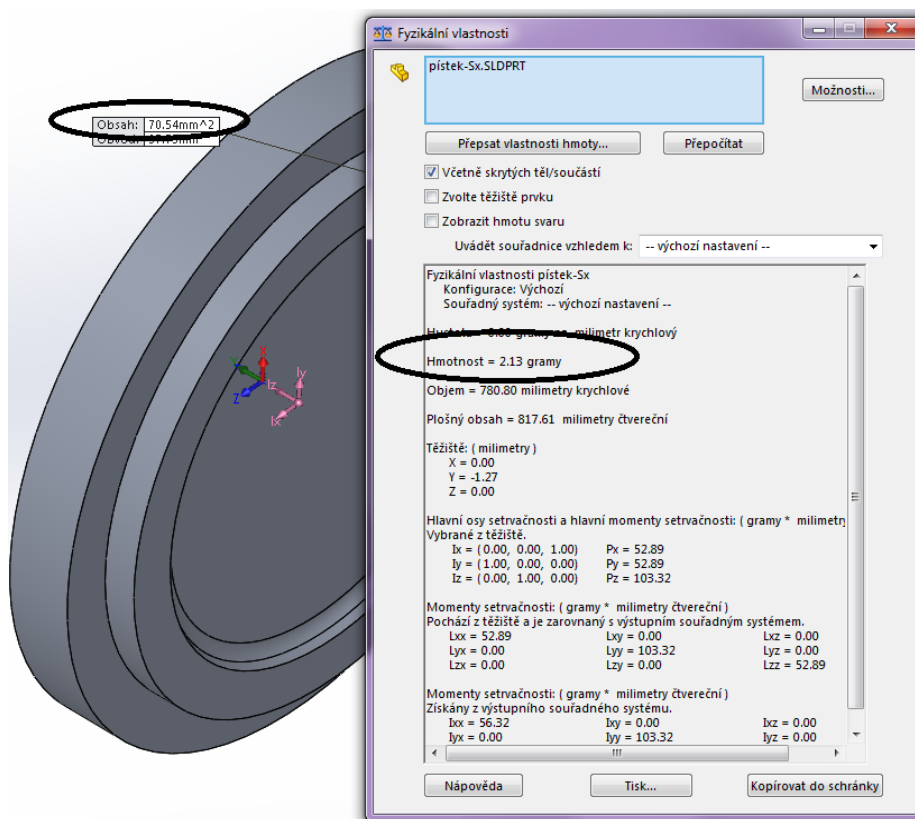
4.3 NEJSLABŠÍHO MÍSTA PLÁŠTĚ PÍSTU – NAMÁHÁNÍ TAHEM

Na konci výfukového zdvihu se při doběhu pístu k horní úvratí mění tlakové namáhání na tahové způsobené setrvačnými silami od hmotnosti koruny pístu.

4.3.1 HMOTNOST KORUNY PÍSTU

$$m_x = 2,13 \text{ g}$$

Jedná se o hmotnost části pístu nad řezem A-A viz obr. 24. Hmotnost byla vypočítána pomocí programu Solidworks – viz obr. 25.



Obr. 25 Plocha nejslabšího místa pláště a hmotnost koruny pístu

4.3.2 POLOMĚR KLIKOVÉHO HŘÍDELE

$$r_k = \frac{Z}{2} [\text{mm}] \quad (42)$$

$$r_k = \frac{16 \text{ mm}}{2}$$

$$r_k = 8 \text{ mm}$$

4.3.3 MAXIMÁLNÍ ÚHLOVÁ RYCHLOST KLIKOVÉHO HŘÍDELE

$$\omega_{\max} = \frac{\pi \cdot n}{30} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (43)$$

$$\omega_{\max} = \frac{\pi \cdot 9500 \text{ min}^{-1}}{30}$$

$$\omega_{\max} = 994,838 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.3.4 OJNIČNÍ POMĚR

$$\lambda_o = \frac{r_k}{L_{oj}} [-] \quad (44)$$

$$\lambda_o = \frac{8 \text{ mm}}{35 \text{ mm}}$$

$$\lambda_o = 0,229$$

4.3.5 SETRVAČNÁ SÍLA POSUVNÝCH HMOT

Posuvné hmoty (koruna pístu) v důsledku pohybu mechanismu mají za následek vznik setrvačné síly. Tato síla působí ve směru osy válce. Mění svou velikost a smysl. Největší je v horní, či dolní úvrati. Nás zajímá setrvačná síla působící na nejslabší místo pláště pístu v oblasti horní úvrati, pro kterou platí následující vztah:

$$F_{sp,x} = m_x \cdot r_k \cdot \omega_{max}^2 \cdot (1 + \lambda_o) [\text{N}] \quad (45)$$

$$F_{sp,x} = 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 994,838^2 \text{ rad}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot (1 + 0,229)$$

$$F_{sp,x} = 20,719 \text{ N}$$

4.3.6 MAXIMÁLNÍ TAHOVÉ NAPĚTÍ

$$\sigma_t = \frac{F_{sp,x}}{S_x} [\text{MPa}] \quad (46)$$

$$\sigma_t = \frac{20,719 \text{ N}}{70,54 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_t = 0,294 \text{ MPa}$$

Dovolená hodnota tahových napětí se pro v současnosti používaná hliníkové slitiny pohybuje v rozmezí $4 \div 10 \text{ MPa}$ [1].

$$0,294 \text{ MPa} < 4 \div 10 \text{ MPa} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

4.4 MĚRNÝ TLAK NA PLÁŠTI PÍSTU

Tlak je vyvolán normálovou silou, která působí na stěnu válce. Její velikost dosahuje maxima při expanzním zdvihu poblíž horní úvrati. Síla je určována za pomoci kinematiky klikového mechanismu (viz obr. 26) a průběhem tlaků plynů při hoření směsi ve válci motoru. Tlak plynů je největší při úhlu natočení klikového hřídele $\alpha_{pmax} = 377^\circ$ (viz obr. 18).

4.4.1 ÚHEL POOTOČENÍ KLIKOVÉHO HŘÍDELE OD HORNÍ ÚVRATĚ

$$\alpha = \alpha_{pmax} - 360^\circ [^\circ] \quad (47)$$

$$\alpha = 377^\circ - 360^\circ$$

$$\alpha = 17^\circ$$

4.4.2 SÍLA PŮSOBÍCÍ NA PÍST OD TLAKU PLYNŮ

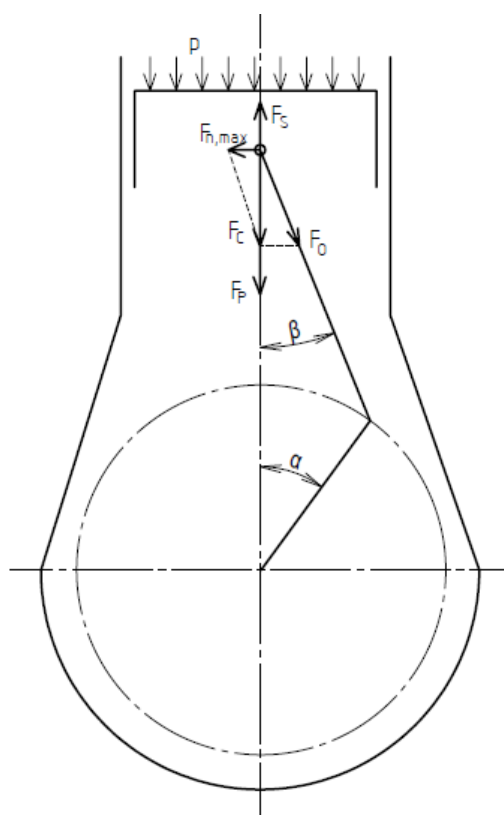
$$F_P = (p_{max} - p_{atm}) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \text{ [N]} \quad (48)$$

$$F_P = (5,877 \text{ MPa} - 101\,325 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}) \cdot \frac{\pi \cdot 20^2 \text{ mm}^2}{4}$$

$$F_P = 1\,814,482 \text{ N}$$

Kde:

p_{atm} ...atmosférický tlak [MPa]



Obr. 26 Silové poměry v klikovém mechanismu

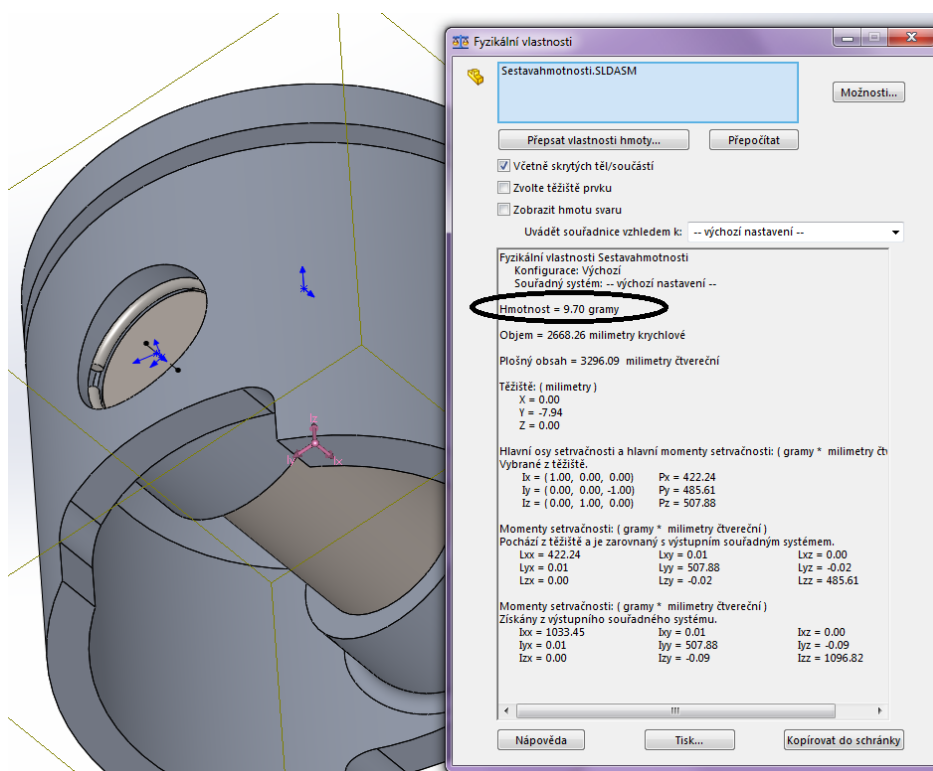
4.4.3 CELKOVÁ HMOTNOST POSUVNÝCH HMOT

Hmotnost posuvných hmot je důležitá pro výpočet celkové setrvačné síly působící na píst. Tato hmotnost se rovná hmotnosti pístní skupiny a posouvající se části ojnice. Hmotnost pístní skupiny byla za pomoci programu Solidworks vyčíslena $m_{ps} = 9,7 \text{ g}$, hmotnost ojnice $m_{oj} = 9,64 \text{ g}$ (viz obr. 27, 28). Hmotnost posouvající se části ojnice lze přibližně uvažovat jako 30% hmotnosti ojnice. Pak obdržíme:

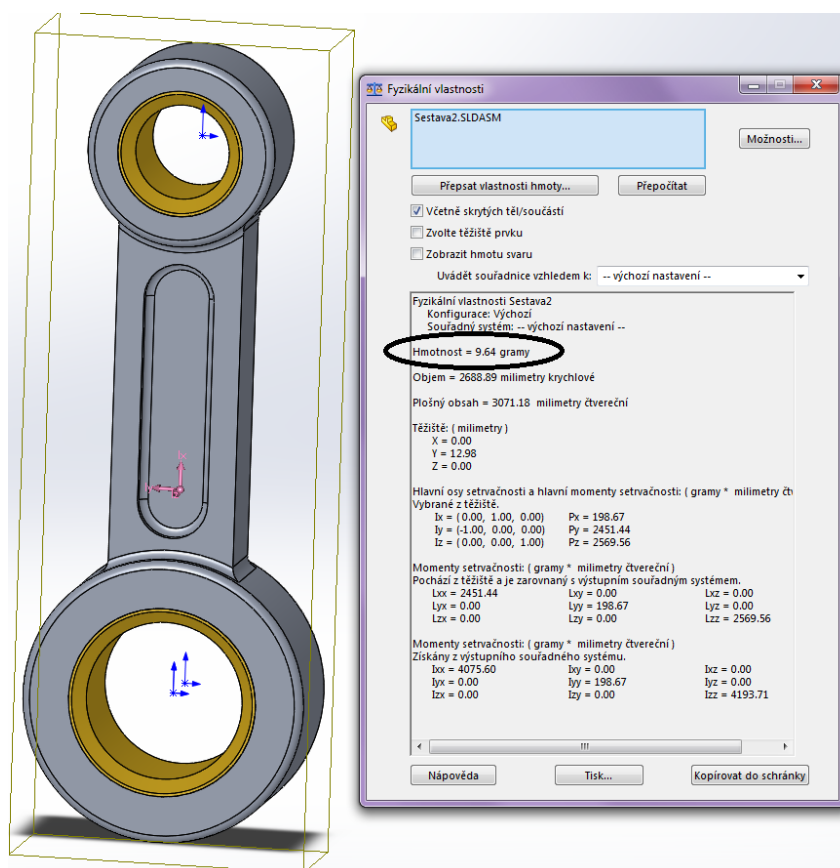
$$m_c = m_{ps} + 0,3 \cdot m_{oj} \text{ [g]} \quad (49)$$

$$m_c = 9,7 \text{ g} + 0,3 \cdot 9,64 \text{ g}$$

$$m_c = 12,592 \text{ g}$$



Obr. 27 Hmotnost pístní skupiny



Obr. 28 Hmotnost ojnice

4.4.4 SETRVAČNÁ SÍLA PŮSOBÍCÍ NA PÍST

$$F_S = -m_p \cdot r_k \cdot \omega_{\max}^2 \cdot (\cos(\alpha) + \lambda_o \cdot \cos(2\alpha)) \text{ [N]} \quad (50)$$

$$F_S = -12,592 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 994,838^2 \text{ rad}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot (\cos(17^\circ) + 0,229 \cdot \cos(2 \cdot 17^\circ))$$

$$F_S = -114,235 \text{ N}$$

Znaménko mínus značí, že síla jde opačným směrem než síla F_P .

4.4.5 VÝSLEDNÁ SÍLA PŮSOBÍCÍ NA PÍST VE VERTIKÁLNÍM SMĚRU

$$F_C = F_P + F_S \text{ [N]} \quad (51)$$

$$F_C = 1\,814,482 \text{ N} + (-114,235 \text{ N})$$

$$F_C = 1\,700,247 \text{ N}$$

4.4.6 ÚHEL MEZI OSOU OJNICE A OSOU VÁLCE

$$\beta = \sin^{-1}(\lambda_o \cdot \sin(\alpha)) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (52)$$

$$\beta = \sin^{-1}(0,229 \cdot \sin(17^\circ))$$

$$\beta = 3,832^\circ$$

4.4.7 MAXIMÁLNÍ NORMÁLOVÁ SÍLA

$$F_{n,\max} = F_C \cdot \tan(\beta) \text{ [N]} \quad (53)$$

$$F_{n,\max} = 1\,700,247 \text{ N} \cdot \tan(3,832^\circ)$$

$$F_{n,\max} = 113,878 \text{ N}$$

4.4.8 MĚRNÝ TLAK

$$p_{pl} = \frac{F_{n,\max}}{D \cdot H_{pl}} \text{ [MPa]} \quad (54)$$

$$p_{pl} = \frac{113,878 \text{ N}}{20 \text{ mm} \cdot 15 \text{ mm}}$$

$$p_{pl} = 0,38 \text{ MPa}$$

Nejvyšší doporučené hodnoty měrného tlaku se pohybují v rozmezí $0,6 \div 1,4 \text{ MPa}$ [1].

$$0,38 \text{ MPa} < 0,6 \div 1,4 \text{ MPa} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

ZÁVĚR

Jedním z cílů této bakalářské práce bylo provést rešerši současně vyráběných menších autonomních prostředků, zejména možnými druhy dostupných pohonů. Pro každý druh pohonu byli vybráni zástupci a byly zhodnoceny výhody a nevýhody daného druhu pohonu.

Na první část práce navazuje detailnější seznámení s maloobjemovými spalovacími motory v současnosti nabízenými na trhu. U motorů byla podrobně rozvedena všechna možná koncepční řešení lišící se například pohybem pístu, způsobem zapalování palivové směsi nebo počtem dob připadajících na jeden oběh. Popsány byly zejména charakteristiky, vlastnosti a vzájemné porovnání mezi jednotlivými řešeními. Práce pokračuje detailnějším pohledem na jednotlivé části spalovacích motorů. U každé z nich jsou rozvedeny použité materiály, technologie výroby a také možné odlišnosti pro různá koncepční řešení motorů. Dalším cílem této práce bylo dokázat, že použití spalovacího motoru pro menší autonomní prostředek rozhodně není špatnou volbou, která může přinést či jen zlepšit řadu vlastností, které nám elektrický pohon dát nemůže. Jakmile byly tyto body splněny, dalším úkolem, resp. motivací bylo vytvořit vlastní návrh spalovacího motoru, který by právě nahradil motor elektrický.

Samotný vlastní návrh motoru lze nalézt v kapitole třetí. Postupovalo se podle zadané předlohy, ze které také pochází část informací potřebných pro výpočet. Zbylé veličiny byly převzaty z různých tabulek z použitých informačních zdrojů. Po výpočtu nejzákladnějších parametrů motoru následovalo pár výpočtů potřebných pro porovnání s dovolenými hodnotami, které jsou hraniční pro běžné spalovací motory. Všechny tyto výpočty vyhověly. Rovněž byl určen nejdůležitější rozměr motoru, čímž je vrtání válce. Od této hodnoty se odvíjí základní rozměry pístu, ojnice a klikového hřídele, jenž byly určeny za pomoci osvědčených empirických vztahů. Nejdůležitější část motoru (klikový mechanismus) byl vymodelován v programu Solidworks 2015, pomocí něhož se výsledný návrh lépe prezentuje. Při návrhu klikového mechanismu byly hojně využívány znalosti nabyté z rozboru jednotlivých částí maloobjemových motorů. Například je patrné, že píst má jen jeden pístní kroužek, ojnice má nedělenou hlavu a klikový hřídel vypadá jako ostatní ve své kategorii.

Hotové modely byly také užitečné k některým výpočtům, což je poslední část z této práce. Výpočty dílů nejsou zdaleka kompletní, byl kladen důraz na nejvíce namáhané a tím pádem nejvíce kritické body celého motoru, týkající se pístu. Veškeré výpočty se ukázaly jako vyhovující, výsledky se pohybovali v dovolených normách. Další výpočty by již přesahovaly rámec této práce. Jejich složitost si už říká o použití metody konečných prvků. Úplným závěrem lze konstatovat, že všechny body zadání byly splněny.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] RAUSCHER, J.: Ročníkový projekt (studijní opory), Brno, FSI VUT
- [2] RAUSCHER, J.: Spalovací motory (studijní opory), Brno, FSI VUT
- [3] RAUSCHER, J.: Vozidlové motory (studijní opory), Brno, FSI VUT
- [4] MACEK, Jan. Spalovací motory. 2. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05015-6.
- [5] POLÓNI, Marián. Základy piestových spaľovacích motorov. 2. prepracované vydanie. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2017. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-4715-8.
- [6] Bezpilotní letadlo. Wikipedie: Otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bezpilotn%C3%AD_letadlo
- [7] Dron DJI Inspire 2. DJI [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/inspire-2>
- [8] Dron AirDog ADII. Airdog [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.airdog.com/>
- [9] Dron BRUS. Armádní noviny [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.armadninoviny.cz/e2809eostra22-premiera-ceskeho-bezpilotniho-stroje-v-municnim-skladu.html?hledat=brus>
- [10] Dron JetQuad. Fusion Flight [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://fusionflight.com/jetquad/>
- [11] Dron Yeair!. Yeair [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://yeair.de/>
- [12] Motor 49-PI Type II. O.S.ENGINES [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.os-engines.co.jp/english/2006autumn/rotary49.html>
- [13] Motor FS 30AR. Pelikan Daniel [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.pelikandaniel.com/?sec=product&id=3483>
- [14] Spalovací motory pro RC modely. RC bazar [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.rcbazar.cz/clanky/motory-i-452/>
- [15] Náhradní díly spalovacích motorů. Pelikan Daniel [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.pelikandaniel.com/>
- [16] Vložky válců spalovacích motorů. MECOA [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.mecoa.com/faq/abc/abc.htm>
- [17] Modelářské spalovací motory. RC-zoom [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.rc-zoom.cz/letecke-modelarske-spalovaci-motory-uvod/>

- [18] Paliva pro modelářské dvoudobé motory. KHMM [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.khmm.cz/2011/11/22/paliva-pro-modelarske-dvoudobe-motory/>
- [19] RC diesel engines. RC-Universe [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.rcuniverse.com/forum/car-nitro-gas-engines-269/11166349-rc-diesel-engines.html>
- [20] 4 stroke engine - lubrication. RC-Universe [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.rcuniverse.com/forum/glow-engines/8775388-4-stroke-how-does-oil-get-top-end-exactly-print.html>
- [21] Compression ratios. Model-engineer [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.model-engineer.co.uk/forums/postings.asp?th=83083>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A_o	[J]	Práce oběhu motoru
b_1	[mm]	Šířka ojnicního čepu
b_2	[mm]	Šířka hlavního čepu
c	[mm]	Šířka ramena kliky
c_s	[m · s ⁻¹]	Střední pístová rychlost
D	[mm]	Velikost vrtání válce
d_1	[mm]	Průměr ojnicního čepu
d_2	[mm]	Průměr hlavního čepu
$D_{\check{c}}$	[mm]	Průměr pístního čepu
D_{D1}	[mm]	Vnitřní průměr hlavy ojnice
D_{D2}	[mm]	Vnější průměr hlavy ojnice
D_{H1}	[mm]	Vnitřní průměr oka ojnice
D_{H2}	[mm]	Vnější průměr oka ojnice
F_C	[N]	Výsledná síla působící na píst ve vertikálním směru
$F_{n,max}$	[N]	Maximální normálová síla
F_P	[N]	Síla působící na píst od tlaku plynů
F_{pmax}	[N]	Maximální síla od tlaku plynů
F_S	[N]	Setrvačná síla působící na píst
$F_{sp,x}$	[N]	Setrvačná síla působící na nejslabší místo pláště pístu
$H_{\check{c}}$	[mm]	Vzdálenost pojistných kroužků
H_D	[mm]	Šířka hlavy ojnice
H_H	[mm]	Šířka oka ojnice
H_k	[mm]	Kompresní výška pístu
H_{m1}	[mm]	Výška prvního můstku
H_o	[mm]	Vzdálenost mezi nálitky pístního čepu
H_p	[mm]	Výška pístu
H_{pl}	[mm]	Výška pláště pístu
i	[-]	Počet válců motoru
k	[-]	Zdvihový poměr
L_{oj}	[mm]	Délka ojnice
m_c	[g]	Celková hmotnost posuvných hmot
$M_{o,max}$	[N · mm]	Maximální ohybový moment

m_{oj}	[g]	Hmotnost ojnice
m_{ps}	[g]	Hmotnost pístní skupiny
m_x	[g]	Hmotnost koruny pístu
n	[min ⁻¹]	Jmenovité otáčky motoru
p_{atm}	[MPa]	Atmosférický tlak
P_e	[W]	Efektivní výkon motoru
p_e	[MPa]	Střední efektivní tlak oběhu
p_i	[MPa]	Střední indikovaný tlak oběhu
P_l	[kW · l ⁻¹]	Litrový výkon motoru
p_{max}	[MPa]	Maximální tlak vzniklý ve válci
p_{pl}	[MPa]	Měrný tlak na plášti pístu
r_k	[mm]	Poloměr klikového hřídele
S_x	[mm ²]	Plocha nejslabšího místa pláště pístu
T	[mm]	Šířka ojnice
t_o	[mm]	Tloušťka dřívku ojnice
t_{ol}	[mm]	Tloušťka ojnice
V_K	[cm ³]	Kompresní objem motoru
V_M	[cm ³]	Zdvihový objem motoru
V_Z	[cm ³]	Zdvihový objem válce
W_o	[mm ³]	Průřezový modul v ohybu
Z	[mm]	Zdvih pístu
η_m	[-]	Mechanická účinnost motoru
τ	[-]	Taktnost motoru
α	[°]	Úhel pootočení klikového hřídele od horní úvratě
α_{pmax}	[°]	Úhel pootočení klikového hřídele při maximálním tlaku
β	[°]	Úhel mezi osou ojnice a osou válce
δ	[mm]	Tloušťka dna pístu
ε	[-]	Kompresní poměr
λ_o	[-]	Ojniční poměr
$\sigma_{o,max}$	[MPa]	Maximální ohybové napětí
σ_t	[MPa]	Maximální tahové napětí
$\sigma_{tl,max}$	[MPa]	Maximální tlakové napětí
ω_{max}	[rad · s ⁻¹]	Maximální úhlová rychlost klikového hřídele